

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství**

**Návrh inteligentního vysokoteplotního senzoru na bázi  
termokaplového měření s CAN komunikací**

**Intelligent High Temperature Sensor based on  
Thermocouple Principle with CAN Communications**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Čerbák**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2612T041 Řídicí a informační systémy

Téma: **Návrh inteligentního vysokoteplotního senzoru na bázi termokaplového měření s CAN komunikací**  
**Intelligent High Temperature Sensor based on Thermocouple Principle with CAN Communications**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Analýza současného stavu vysokoteplotních měření v oblasti automotive.
2. Návrh koncepce senzoru pro vysokoteplotní měření.
3. Návrh a realizace hardwarové části senzoru.
4. Návrh a realizace softwarové části senzoru.
5. Verifikace a testování.
6. Zhodnocení dosažených výsledků závěrečné práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

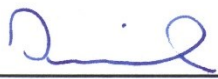
- [1] MICHALSKI, L., K. ECKERSDORF, J. KUCHARSKI a J. MCGHEE. *Temperature measurement*. 2nd ed. New York: J. Wiley, 2001. ISBN 978-0471867791.
- [2] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. Technická diagnostika - senzory, metody, analýza signálu. ISBN 80-730-0158-6.
- [3] *CiA: CAN protocol specification*. [online]. [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: <http://www.can-cia.org>

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Žídek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 30.04.2018

  
doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.  
vedoucí katedry

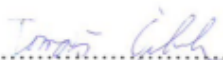


  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

---

## **Prohlášení**

*„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal“*

..........

Tomáš Čerbák

Datum odevzdání diplomové práce: 30.04.2018

### **Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby**

*„Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.“*



Ing. Radim Hercík, Ph.D.

Datum odevzdání diplomové práce: 30.04.2018

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Janu Žídkovi, CSc., za vedení a zaštitění zadaného úkolu. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Radimu Hercíkovi, Ph.D. a Bc. Robertovi Kučerovi za odbornou pomoc a vedení při tvorbě schémat a programu.

## **Abstarkt**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem měření teploty principem termokaplového jevu. Rozborem použitelnosti a používaností termočlánků v automotive. Práce řeší návrh desky pro zpracování informace od termočlánku a posílání informací po CAN sběrnici. Je zde výběr komponent dle jejich parametrů s ohledem na jejich výhody při použití v této aplikaci. Práce dále řeší výrobu plošného spoje a tvorbu software pro použité MCU. Jsou zde navrženy testy, které ověřují správnost demonstračního prvku a také které ověří schopnost použitelnosti v automotive.

## **Klíčová slova**

Termočlánek, MCU, 24bit ADC, CAN, sběrnice, plošný spoj, měření teploty, vysokoteplotní sensor,

## **Abstract**

This thesis describes the design temperature measurement principle termokaplového phenomenon. Usage analysis of usability and thermocouples in automotive. Work is design boards for processing information from the thermocouple and sending information over the CAN bus. There is a selection of the components according to their parameters with regard to their advantages when used in this application. The work also addresses the production of PCB and software development for the MCU used. There are tests designed to verify the accuracy of the demonstration element and also to verify the ability of application in the automotive industry.

## **Key Words**

Thermocouple, MCU, 24bit ADC, CAN bus, printed circuit board, measuring temperature, high temperature sensor,

## Obsah

1. Úvod.....	15
2. Analýza současného stavu vysokoteplotních měření v oblasti automotive.....	17
2.1. Měření teploty .....	17
2.2. Měření pomocí termočlánku .....	30
2.3. CAN komunikace .....	35
2.4. Zpracování analogových informací.....	40
Úprava vstupního rozsahu analogového signálu .....	40
Modul analogových vstupů .....	41
Vzorkování hodnoty z A/D modulu .....	41
Převod analogového signálu.....	42
Integrační metoda.....	42
Metoda U/f.....	44
Komparační metoda .....	45
Kompenzační metoda.....	47
Vyjádření hodnoty analogového signálu.....	49
Reprezentace hodnot analogového signálu .....	50
Přerušení.....	50
Diagnostika .....	50
Galvanické oddělení.....	50
2.5. Úprava digitálních informací .....	51
3. Návrh koncepce sensoru pro vysokoteplotní měření.....	54
3.1. Použitý termočlánek.....	55
3.2. Použitý převodník .....	56
3.3. Použitý Mikrokontrolér (MCU) .....	58
3.4. Použitý CAN driver.....	60
4. Návrh a realizace HW části.....	62
4.1. Návrh schématu.....	62
4.1.1. Regulátor napětí .....	63
4.1.2. Napěťový vstup z termočlánku .....	65
4.1.3. Mikrokontrolér MICROCHIP pic32 .....	68
4.1.4. CAN sběrnice .....	71
4.2. Rozmístění komponent.....	73



4.3.	Tvorba plošného spoje .....	74
5.	Návrh a realizace SW části.....	76
5.1.	Koncepce řešení .....	76
5.2.	Hlavní části programu .....	78
5.2.1.	SPI rozhraní.....	80
5.2.2.	Timer .....	82
5.2.3.	ADC převodník .....	83
5.2.4.	CAN .....	88
6.	Verifikace a testování.....	90
6.1.	Oživení a ověření HW části .....	90
6.2.	Ověření SW části.....	91
6.3.	Verifikace teplotního sensoru.....	92
7.	Zhodnocení dosažených výsledků.....	95
8.	Závěr .....	96
9.	Použitá literatura .....	97
10.	Přílohy .....	98

## **Seznam použitých zkratk a symbolů**

**MCU** – mikrokontrolér (microcontroller)

**CAN** - (Controller Area Network) je sběrnice, využívaná nejčastěji pro vnitřní komunikační síť senzorů a funkčních jednotek v automobilu

**PTC** - termistor s pozitivním teplotním koeficientem

**NTC** - termistor s negativním teplotním koeficientem

**LED** - dioda emitující světlo

**TC** – Termočlánek

**C, C++** – Programovací jazyky

## **Seznam ilustrací a seznam tabulek**

Obr.:2.1.1.: Dotykové měření teploty

Obr.:2.1.2.: Převodní charakteristika různých typů dotykových odporových senzorů teploty a příklad zapouzdření platinového čidla Pt100

Obr.:2.1.3.: Platinový odporový kovový sensor

Obr.:2.1.4.: Niklový odporový kovový sensor

Obr.:2.1.5.: odporový polovodičový sensor

Obr.:2.1.6.: termistor NTC

Obr.:2.1.7.: termistor PTC

Obr.:2.1.8.: Monokrystalické odporové sensory

Obr.:2.1.9.: Monokrystalické křemíkové PN senzory

Obr.:2.1.10.: Termoelektrický sensor

Obr.:2.1.11.: Bezdotykové měření teploty

Obr.:2.1.12.: Blokové schéma měřicího řetězce bezkontaktních (bezdotykových) snímačů teploty

Obr.:2.1.13.: infračervený tepelný sensor

Obr.:2.1.14.: Infračervený termočlánek

Obr.:2.1.15.: Bolometr

Obr.:2.1.16.: Pyroelektrický sensor

Obr.:2.2.1. Termoelektrický princip

Obr.:2.2.2. Eliminace studeným koncem

Obr.:2.2.3. Eliminace izotermálním blokem

Obr.:2.2.4. Eliminace softwarovou kompenzací

Obr.:2.2.5. Závislost termoelektrického napětí na teplotě pro různé typy termočláneků

Obr.:2.2.6. Závislost termoelektrického napětí na teplotě pro různé typy termočláneků

Obr.:2.2.1. Principiální zapojení CAN sběrnice

Obr.:2.2.2. Toleranční pásmo napěťových úrovní logických stavů na sběrnici CAN

Obr.:2.2.3. Přenos jednoho bitu CAN

Obr.:3.4.1.: Datový blok

Obr.:2.4.1.: Odporový dělič s přepínáním rozsahů pro měření napětí.

Obr.: 2.4.2.: Odporové bočníky s přepínáním rozsahu pro měření proudu.

Obr.: 2.4.3.: Principiální schéma modulu A/D převodníku pro 8 kanálů.

Obr.: 2.4.4.: Principiální schéma převodníku s jednoduchou integrací

Obr.: 2.4.5.: Principiální schéma převodníku s dvojitou integrací

Obr.: 2.4.6.: Principiální schéma převodníku využívající řízení frekvence oscilátoru

Obr.: 2.4.7.: Principiální schéma převodníku s komparátory

Obr.: 2.4.8.: Principiální schéma převodníku s postupnou komparací

Obr.: 2.4.9.: Principiální schéma kompenzačního převodníku

Obr.: 2.4.10.: Principiální schéma sledovacího kompenzačního převodníku

Obr.: 2.4.10.: Principiální schéma aproximačního kompenzačního převodníku

Obr.: 2.4.11.:Průběh interního napětí pro unipolární signál

Obr.: 2.4.12.:Průběh interního napětí pro bipolární signál

Obr.: 2.5.1.: Řez 8-bitovým mikrokontrolerem

Obr.: 2.5.2.: Instrukční cyklus

Obr.: 2.5.3.: Harwardská a von Neumannova koncepce organizace paměti

Obr.:3.1.: Koncepce sensoru vysokoteplotního sensoru

Obr.:3.1.1.: Zjednodušený termočlánekový obvod typu N

Obr.:3.1.2.: Použitý termočlánek typu N

Obr.:3.2.1.: A/D převodník MCP3911A0-E

Obr.:3.2.2.: A/D převodník MCP3911A0-E

Obr.:3.2.3.: Blokový diagram A/D převodníku MCP3911A0-E

Obr.:3.2.4.: Clock diagram A/D převodníku MCP3911A0-E

Obr.:3.3.1.: Mikrokontrolér PIC32MX575F256H-80I

Obr.:3.3.2.: Mikrokontrolér PIC32MX575F256H-80I

Obr.:3.3.3.: Blokové schéma mikrokontroléru PIC32MX575F256H-80I

Obr.:3.4.1.: CAN driver TJA1057

Obr.:3.4.1.2.: CAN driver TJA1057

Obr.:3.4.1.3.: Blok diagram CAN driver TJA1057

Obr.:4.1.1.: Obvod pro měření teploty s termočlánkem

Obr.:4.1.1.1.: Vzorové zapojení

Obr.:4.1.1.2.: Připojovací rozměry

Obr.:4.1.1.3.: Regulátor napětí

Obr.:4.1.2.1.: Připojovací rozměry A/D převodníku

Obr.:4.1.2.2.: Teplotní vstup

Obr.:4.1.2.3.: Teplotní vstup s A/D převodníkem

Obr.:4.1.2.4.: Napěťová reference

Obr.:4.1.2.5.: Chladný bod

Obr.:4.1.3.1: Napájení mikrokontroléru MICROCHIP pic32

Obr.:4.1.3.2: Připojení programátoru k mikrokontroléru MICROCHIP pic32

Obr.:4.1.3.3: Vnitřní schéma Mikrokontroléru MICROCHIP pic32

Obr.:4.1.3.4: Mikrokontrolér MICROCHIP pic32

Obr.:4.1.4.1: Vnitřní schéma CAN sběrnice

Obr.:4.1.4.2: Vnitřní schéma CAN sběrnice

Obr.:4.1.4.3: Připojovací rozměry CAN sběrnice

Obr.:4.1.4.4: CAN sběrnice

Obr.:4.2.1.: Návrh rozmístění komponent

Obr.:4.2.2.: Rozmístění komponent přední strana

Obr.:4.2.3.: Rozmístění komponent zadní strana

Obr.:4.3.1.: Maska DPS přední strana

Obr.:4.3.2.: Maska DPS zadní strana

Obr.:4.3.3.: Osazená DPS

Obr.:5.1.1.: Blokový digram SW řešení

Obr.:5.1.2.: Stavový digram testovací funkce sensoru

Obr.:5.1.3.: Funkcionalita sensoru

Obr.:5.2.1.: Pin diagram s použitými pin

Obr.:5.2.2.: Clock diagram v HARMONY Configurator

Obr.:5.2.1.1.: SPI blok diagram

Obr.:5.2.1.2.: Zapojení SPI komunikace

Obr.:5.2.2.1.: Timer blok diagram

Obr.:5.2.3.1.: ADC modul blok diagram

Obr.:5.2.3.2.: Lookup tabulka TC od 0°C do 99°C

Obr.:5.2.3.3.: Lookup tabulka NTC od -100°C do 220°C

Obr.:5.2.3.4.: Lineární interpolace měřených dat TC

Obr.:5.2.3.5.: Lineární interpolace měřených dat NTC

Obr.:5.2.4.1.: Zapojení CAN driveru

Obr.:5.2.4.2.: Hlídaní chyby v přijímaných datech

Obr.:5.2.4.3.: CAN blok diagram

Obr.:5.2.4.4.: Formát zasílaných zpráv po CAN

Obr.:5.2.4.5.: Zasílání zpráv po CAN

Obr.:6.2.1.: Ukázka Watches tabulky

Obr.:6.3.1.: Zaznamenané hodnoty CAN log v P-CAN

Obr.:6.3.2.: Zaznamenané hodnoty CAN log

Obr.:6.3.3.: Graf měřených hodnot TC

Obr.:6.3.4.: Graf měřených hodnot NTC

## 1. Úvod

Tato práce se zabývá návrhem demonstrační úlohy pro vysokoteplotní měření na bázi termočlánu. Výhodou termočlánu je snadná připojitelnost pomocí dvou pinů a měření jeho napětí. Nevýhodou ovšem je nízká napěťová úroveň, která znesnadňuje zpracování měřené hodnoty. A tímto se zabývá první část diplomové práce. Práce se zabývá demonstrováním této technologie, proto je její součástí také zpracování teoretického vysokoteplotního měření i jinými principy než pouze pomocí termočlánu.

Další část se zabývá zpracováním naměřených dat pomocí MCU a posíláním dat pomocí CAN sběrnice. Tato část řeší veškerý software na této desce od zpracování signálu z termočlánu a jeho zpracování, až po posílání dat na sběrnici. Zpracování naměřených hodnot z termočlánu musí být velmi precizní a přesné, protože termočlánek má změnu napětí ku změně teploty velmi nízkou, řádově se změny pohybují v mV. Na přesnost a kvalitu zpracování měřených hodnot je proto kladen velký důraz.

Termočlánek je zapůjčen firmou Continental, která zapůjčila termočlánek typu „N“ pro který je navržena řídicí deska. Proto je nezbytné se seznámit s problematikou termočlánu a jeho používáním v praxi. Zhodnotit jeho klady a zápory, pro navržení použití jiných technologií, které by mohly zefektivnit, zjednodušit nebo zlevnit výrobu měřících prvků v automobilovém průmyslu. Pro návrh demonstrační soustavy se vychází se zapůjčeného termočlánu, proto je v práci rozebrán princip měření termočlánekem obecně, ale pro samotnou demonstrační úlohu je použit pouze termočlánek typu N.

Diplomová práce obsahuje správné naddimenzování komponent a navržení měřicí soustavy. Navržení desky plošných spojů, bude provedeno s ohledem na funkčnost a vyrobitelnost. Návrh musí obsahovat veškeré náležitosti pro výrobu desky. Tato deska bude vyrobena dostupnou technologií pro tvorbu plošných spojů a pro pájení komponent. Deska je vytvářena svépomocí, proto miniaturizace desky a tím celé demonstrační soustavy je limitována schopností vyleptat plošný spoj co v nejmenších rozměrech, a také komponenty na desku jsou voleny s ohledem na jejich rozměry, aby pouzdra součástek byla dostatečně velká.

Pro vybrané MCU je nezbytné pracovat s programovacím prostředím, v jazyce C, C++. Programovatelnost desky se také musí vzít v úvahu při tvorbě desky plošných spojů, aby bylo možné mikrokontrolér programovat a ladit funkčnost programu. Z tohoto důvodu jsou na desce připojené připojovací kolíky. MCU musí mít zabudované CAN porty, kterými je možné posílat data na CAN codér. Pro programování a parametrování mikrokontroléru je použit dostupný software, který dodává výrobce. Veškeré pomocné programy pro nahrávání jsou také od dodavatele mikrokontroléru.

Posílaná data po CAN sběrnici budou zobrazována v CAN Logu, který bude zaznamenávat posílané informace o teplotě a informace o řídicí desce. Po sběrnici se také posílají data, která jsou kontrolní a umožní kontrolovat funkčnost desky a měření. Tím se testuje samotná komunikace, nikoli měření samotné. Toto má velký význam v části testování a ladění programu.

Tato práce také obsahuje testování funkčnosti navržené řídicí desky, jakožto část hardwarovou a také testování řídicího programu a informační sběrnice jako část softwarovou. Tento celek obou stěžejních částí diplomové práce umí zaznamenávat měřené napětí a přepočíst jej na teplotu a tyto informace posílat pro CAN Log po sběrnici ven z řídicí desky.

Diplomová práce ovšem neřeší miniaturizace desky a cenové řešení při sériové výrobě, které by desku zatížilo používáním nejlevnějších dílů. Tato práce je pouze demonstrativní, proto jsou použity i testovací prvky, které by v sériové výrobě nebyly potřebné. Také samotná deska není konstruována a minimalizována pro sériovou výrobu.



## 2. Analýza současného stavu vysokoteplotních měření v oblasti automotive

### 2.1. Měření teploty

Teplota je druhou nejčastěji měřenou fyzikální veličinou hned po měření času. Samotné měření teploty lze rozdělit na dva sériově spojené bloky převodu teploty na elektrický signál a na blok zpracování elektrického signálu. Blok převodu teploty na elektrický signál obsahuje tzv. senzory teploty, které mohou pracovat na nejrůznějších principech. Vždy se však využívá vlastností materiálů. [6]

**Senzory teploty lze rozdělit do dvou hlavních skupin:**

**Dotykové měření** – senzor musí být připevněn k objektu, jehož teplotu má měřit. Využívá se zde přenosu tepla mezi dvěma objekty. Lze ho využít všude tam, kde je snadný přístup k měřenému objektu, okolní prostředí nebo sám měřený objekt chemicky nebo jinak nereaguje se senzorem. [6]

**Bezdotykové měření** – senzor se nachází v určité vzdálenosti od měřeného objektu a tím nedochází k vzájemnému ovlivňování. Využívá se zde jevu, kdy každý objekt o určité teplotě vyzařuje určitou vlnovou délku infračerveného záření (pyrometrie). [6]

#### Dotykové měření teploty

Již z výše uvedeného označení je patrné, že měření teploty daného tělesa probíhá přímým přiložením a dotykem měřicího senzoru na jeho povrch (vnější měření, obvykle pevná tělesa) či případně zasunutím do vnitřní struktury materiálu (vnitřní měření, porézní pevná nebo kapalná a plynná tělesa). Samotný základní princip dotykového měření pak spočívá v přenosu tepla materiálu snímaného objektu přes krycí pouzdro samotného senzoru na jeho měřící místo prostřednictvím tepelné vodivosti materiálů. [6]



Obr.:2.1.1.: Dotykové měření teploty [6]

**Výhody:** malý vliv okolního rušení a vlivů na samotné měření = možnost i velmi přesného měření, snadná výroba a použití senzoru, možnost měřit teplotu i uvnitř tělesa. [6]

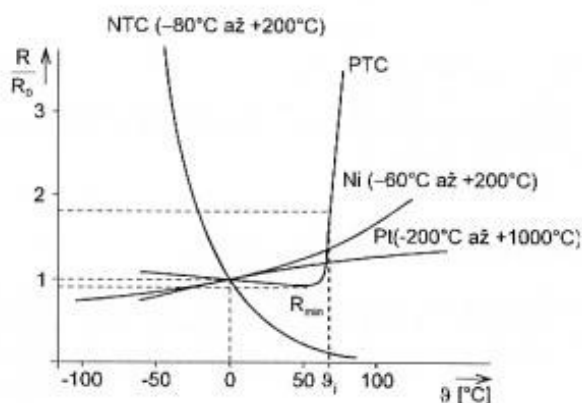
**Nevýhody:** Malý rozsah měřené teploty, rychlost měření závislá na tepelné vodivosti pouzdra senzoru i povrchu měřeného objektu (média), možné ovlivňování měřeného předmětu samotným senzorem (odvod tepla do senzoru, kontaminace látky či objektu látkami či bakteriemi na povrchu senzoru, sondy apod.), pouzdro senzoru je nutné volit podle vlastností měřeného materiálu s nímž přichází do styku. [6]

### Odporové kovové senzory

**Princip funkce:** teplotní závislost odporu kovu na teplotě. Ta je způsobena rostoucím počtem srážek volných elektronů s kladnými ionty v mřížce ve vnitřní struktuře kovu při zvyšující se teplotě. [6]

**Výhody:** vysoký rozsah měřitelných teplot, dobrá linearita, časová stálost a možnost použít větších hodnot proudů pro snímání odporu. [6]

**Nevýhody:** malý teplotní součinitel (tj. malá citlivost = malý výstupní signál) a pomalá reakce na změnu teploty (není vhodné pro systémy s velkou dynamikou změn teplot). [6]



Obr.:2.1.2.: Převodní charakteristika různých typů dotykových odporových senzorů teploty a příklad zapouzdrění platinového čidla Pt100 [6]

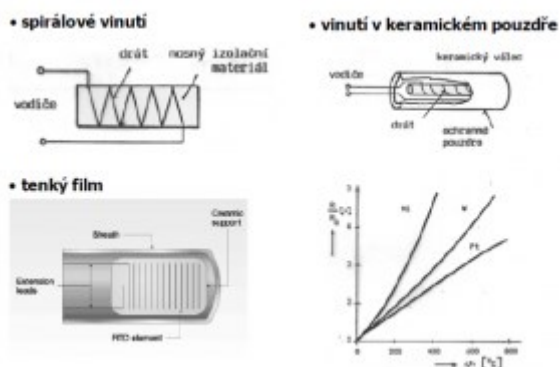
## Typy odporových kovových senzorů:

### Platinové

Typický měřicí rozsah:  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Výroba:** v hodnotách  $R_0 = 100\text{ ohm}$  (Pt100),  $200\text{ ohm}$  (Pt200),  $500\text{ ohm}$  (Pt500),  $1\text{ k ohm}$  (Pt1000), příp.  $2\text{ k ohm}$  (Pt2000) v podobě drátový zatavený do keramiky nebo skla nebo navinutý na pertinaxové či slídové podložce a v tolerančních třídách A (rozsah  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a B (rozsah  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

**Využití:** jako ponorný senzor pro měření teplot vody v topných a chladicích systémech, teploty páry, jako sondy pro měření teploty pečícího se pečiva v pekárnách a dále všude, kde se měří vysoké teploty (například regulace pecí tavby hliníku) atd. [6]



Obr.:2.1.3.: Platinový odporový kovový senzor [6]

## Niklové

Typický měřicí rozsah: -60 °C až +180 °C.

Závislost odporu R na teplotě T:  $R = R_0 ( 1 + 3,83 \cdot 10^{-3} T + 4,64 \cdot 10^{-6} T^2 )$ .

**Výroba:** v hodnotách  $R_0 = 100 \text{ ohm (Ni100)}$ ,  $200 \text{ ohm (Ni200)}$ ,  $500 \text{ ohm (Ni500)}$ ,  $1k \text{ ohm (Ni1000)}$ , příp.  $2k \text{ ohm (Ni2000)}$  tenkovrstvou technologií na keramické podložce z jemného korundu, kdy se přesná hodnota odporu nastavuje laserem.

**Výhody proti platinovým:** rychlejší odezva na změny teplot, vyšší citlivost a malé rozměry. [6]



*Obr.:2.1.4.: Niklový odporový kovový sensor [6]*

## Měděné

Typický měřicí rozsah: -200 °C až +200 °C.

**Výroba, Využití:** jako sensor se nevyrábí z důvodu malé rezistivity, ale dá se využít pro měření teploty vinutí elektromotoru. [6]

## Speciální slitiny

slitiny Rh-Fe nebo Pt-Co pro teploty již od -250 °C. [6]

## Odporové polovodičové senzory-termistory



*Obr.:2.1.5.: odporový polovodičový sensor [6]*

**Princip funkce:** závislost elektrického odporu materiálu na teplotě vlivem závislosti koncentrace volných nosičů náboje na teplotě.

**Výhody:** velká citlivost, relativně velký výstupní signál.

**Nevýhody:** horší stabilita a větší šum, malý teplotní rozsah, nelinearita. [6]

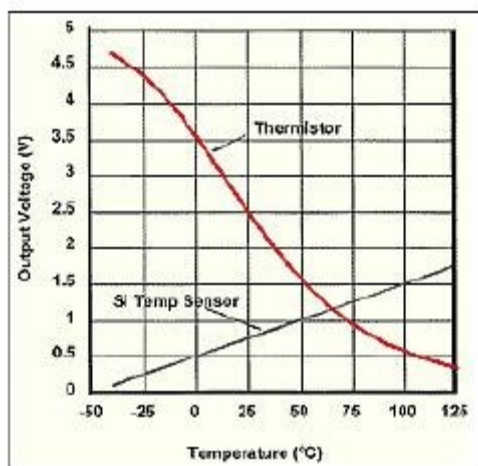
## Typy odporových polovodičových senzorů

### Termistor-negistor (NTC)

**Typický měřicí rozsah** – od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V případně práškové technologie však je možný spodní hranice již od několika K nebo horní hranice až  $1000^{\circ}\text{C}$ . V případě tenkovrstvé technologie pak i rozsahy až  $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+450\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mají záporný teplotní koeficient, tzn. s rostoucí teplotou klesá jejich odpor. [11]

**Výroba:** práškovou technologií, tj. lisováním směsi oxidů kovů (například  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$  nebo  $\text{MnO} + \text{CoO}$  atd.), nebo tenkovrstvou technologií materiálu SiC nebo polykrystalického Si (miniaturní NTC). [11]

**Využití:** pro jen úzké rozmezí měřených teplot jako jsou senzor teploty prostorů ve větracích a klimatizačních zařízeních, venkovní senzory teploty, měření teploty chladicí kapaliny v automobilech apod. [11]



Obr.:2.1.6.: termistor NTC [11]

### Termistory-pozistor (PTC)

**Typický měřicí rozsah:** od +60 °C do +180 °C. Mají kladný teplotní koeficient, tzn. s rostoucí teplotou roste jejich odpor. [11]

**Výroba:** z polykrystalické feroelektrické keramiky (např. BaTiO<sub>3</sub>). [11]

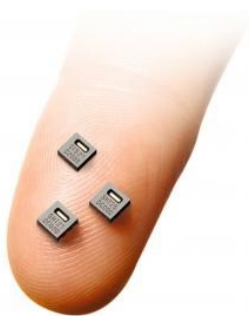
**Využití:** protože jejich charakteristika závislosti odporu na teplotě vykazuje prudký nárůst teploty, využívají se obvykle jako dvoustavové senzory, kde zlomová hodnota teploty je dána chemickým složením pozistoru. [11]



*Obr.:2.1.7.: termistor PTC [6]*

### Odporové polovodičové monokrystalické senzory (CMOS senzory)

**Princip funkce:** založen na změně pohyblivosti volných nosičů náboje (elektronů v případě polovodiče typu N) se změnou teploty. S rostoucí teplotou klesá pohyblivost, tím klesá vodivost polovodiče, a tedy roste odpor. Využívá se v integrovaných obvodech s MOS / CMOS tranzistory. [11]



*Obr.:2.1.8.: Monokrystalické odporové sensory [11]*

**Typický měřicí rozsah:** od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Výhody:** linearita, lepší stabilita než u termistorů

**Nevýhody:** malý teplotní rozsah, menší citlivost než u termistorů [11]

**Výroba:** z křemíku (Si), germania (Ge), india (In) aj., ale v průmyslové praxi se sériově vyrábějí Si senzory.

**Použití:** pro měření běžných teplot s menšími nároky na citlivost. Využívá se v CMOS integrovaných inteligentních senzorech. [11]

### Monokrystalické křemíkové PN senzory

**Princip:** funkce je založena na teplotní závislosti napětí PN přechodu v propustném směru. Teplotní koeficient je záporný a dle struktury přechodu je pohybuje v rozmezí  $-2,5$  až  $2\text{ mV/K}$ .

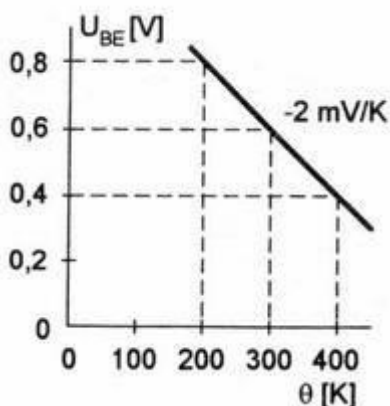
**Typický měřicí rozsah:** od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Výhody:** linearita, citlivost, jednoduchá integrace v IO

**Nevýhody:** malý teplotní rozsah

**Výroba:** využívá PN přechodu báze-emitor tranzistoru. K jednoduchému měření teplot však lze využít jakoukoliv univerzální usměrňovací diodu, jestliže bude napájena ze zdroje proudu a měřit se bude změna napětí na diodě se změnou teploty.

**Použití:** pro měření teploty ve velké většině polovodičových senzorů běžných teplot (chlazení, vytápění, kontrola teploty elektrických zařízení apod.), často již v provedení s integrovanou řídicí a zpracovávající elektronikou přímo na jednom chipu se snímáním teploty. Obvykle se využívá dvou kaskádně zapojených proudových zrcadel, kde jedno z nich je rozvažováno vlivem teploty na přechod B-E. Tomu se někdy říká teplotně řízený zdroj proudu. [11]



Obr.:2.1.9.: Monokrystalické křemíkové PN senzory [11]

## Termoelektrické senzory – termočlánky

Již v roce 1822 objevil princip termočlánku Thomas Seebeck. Termočlánek je velice jednoduché zařízení pro měření teploty, skládající se ze spoje dvou různých kovů – METAL 1 a METAL 2. Seebeck přitom zjistil, že různé kovy mohou být zdrojem různých elektrických potenciálů, závislých na aplikovaném teplotním gradientu. Pokud jsou tyto dva kovy svařeny, tvoří teplotu snímající spoj (TJUNC) a rozdíl vůči druhému spoji (TCOLD – udržovaném na konstantní referenční teplotě) představuje výstupní napětí  $V_{out}$ , které je přímo úměrné teplotě aplikované na svár. Jde tedy o zařízení produkující termočlánekové/nabíjecí napětí, které nevyžaduje použití žádného budicího napětí nebo proudu. [7]

Celá řada průmyslových či lékařských aplikací vyžadují měření teploty v širokém rozsahu (-270 °C až 1750 °C) s přesností lepší než  $\pm 1$  °C, ovšem se zachováním nízké výrobní ceny a nízké spotřeby energie. Jedním z řešení je použití moderních termočlánků a obvodů ADC s vysokým rozlišením. Výsledkem jsou systémy sběru dat (DAS) pokrývající široký teplotní rozsah a reprodukovatelnost měření, vhodných i do těch nejtěžších průmyslových prostředí. [7]

Termočlánky jsou již dlouhá léta používány v širokém rozsahu snímaných teplot. Poslední vývoj v této oblasti, jakož i nové standardy a algoritmy, pomohly výrazně rozšířit dosahovaný teplotní rozsah i výslednou přesnost. V praxi je tak nyní možné dosáhnout přesnosti lepší než  $\pm 0,1$  °C ve velmi širokém rozsahu od -270 °C až do 1750 °C. Chceme-li však tyto možnosti využít, musíme použití měřicího systému s vysokým rozlišením. Vhodným kandidátem na pozici ADC převodníku je tak rozhodně nízkošumový, 24-bitový, delta-sigma analogově-digitální převodník s možností zpracování i velmi malého napětí. Při vývoji systému sběru dat (DAS) lze přitom s výhodou využít běžně dostupné vývojové a hodnotící sestavy (EV) s 24-bitovým ADC a rychle tak přejít v návrhu vlastní aplikace měření teploty v širokém rozsahu. [7]

**Princip funkce:** založen na tzv. Seebeckovu jevu, tj. na jevu přeměny tepelné energie na elektrickou spojením dvou vodičů z různých materiálů v jednom bodě, přičemž na volných koncích vzniká elektrické napětí. Jde tedy o aktivní senzory, které samy generují slabé el. napětí.

**Typický měřicí rozsah:** od -200 až 3 500 °C. Termočlánky se však rozdělují podle druhu spojených kovů do kategorií T/J/E/K/N/S/R/B.

**Výhody:** lineární charakteristiky, velký teplotní rozsah, malé rozměry sond (< 1mm).

**Nevýhody:** malá citlivost = malé hodnoty výstupního napětí, složitější správné připojení k měřicí jednotce pro eliminaci vlivu rušení (okolní teploty na měření).



**Použití:** pro měření velkých změn a absolutních hodnot teploty, například jako sondy ponorné, dotykové, vpichové, prostorové, štěrbinové apod. [12]



*Obr.:2.1.10.: Termoelektrický sensor [12]*

### **Krystalový senzor teploty**

**Princip funkce:** využívá se teplotní závislosti rezonančního kmitočtu křemenného výbrusu.

**Typický měřicí rozsah:** od -80 °C až +250 °C a rozlišovací schopnost až  $10^{-4}$  °C.

**Výhody:** velká rozlišovací schopnost.

**Nevýhody:** horší stabilita, citlivost na okolní rušení.

**Použití:** změna kmitočtu oscilátoru vlivem změny teploty, tzn. přímý převod teploty na frekvenci. Oscilátor je nejčastěji ve spojení s smyčkou fázového závěsu PLL. [12]

### **Senzory s využitím optického vlákna**

**Principy funkce:** Optické vlákno zakončené teplotně závislou vrstvou fosforu, který po osvětlení impulsem světla LED vyzáří zpět s určitým časovým zpožděním dle teploty. Optické vlákno zde funguje jen pro vedení světla.

Změna útlumu vložené vrstvy mezi dvěma konci optických vláken.

Přímé ovlivňování ztrát optického vlákna působením tepla.

**Použití:** měření teplot až do 1500 °C, pro měření v nebezpečných prostorech (výbušné prostředí, prostředí s velkým elmag. rušením, snadno vznětlivých prostředích), pro plošné měření teploty (například kontrola teploty skladovaných materiálů proti samovznícení, teploty kapalin) apod. [13]

## Bezdotykové měření teploty

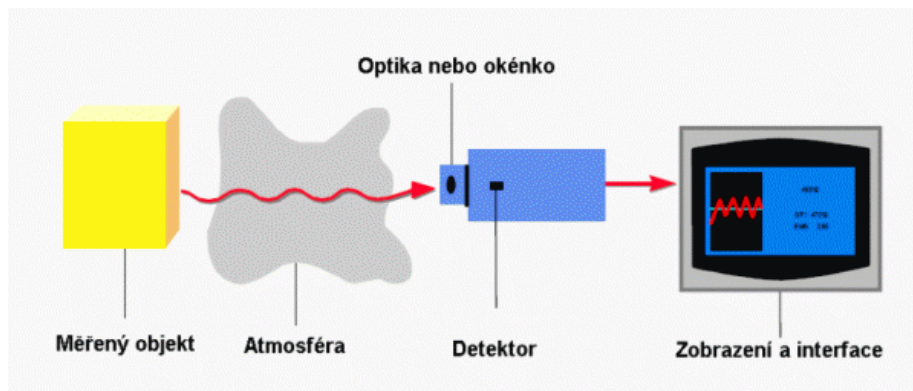


Obr.:2.1.11.: Bezdotykové měření teploty [14]

Bezdotykové měření teploty, tzv. pyrometrie, využívá fyzikálního principu vyzařování infračerveného záření zahřátého objektu. Toto záření je pak zachycováno senzorem (pyrometrem), který ho převede na elektricky měřitelnou veličinu, kterou další elektrické obvody již zpracují obdobně jako u dotykových senzorů. Bezdotykové měření teploty tak z principu umožňuje měřit jen povrchovou teplotu objektu a přímo reaguje na tepelné vyzařování jen té části objektu ve směru, na který je senzor namířen. [14]

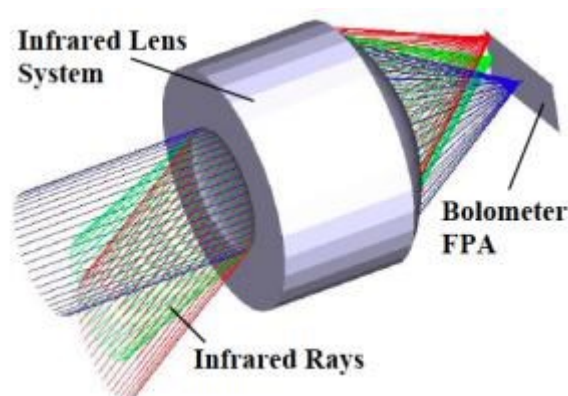
**Výhody:** rychlé měření (v milisekundovém rozsahu), bezpečné měření i vysokých teplot (až do 3 000 °C), zanedbatelný vliv měřicí techniky na měřený objekt, možnost měření pohyblivých objektů, rychlá reakce na změny teploty, lze snímat povrchy těles – tzv. termovize, není riziko kontaminace a vlivu měření na povrch měřeného objektu. [14]

**Nevýhody:** měřený objekt musí být pro senzor opticky viditelný, optika senzoru musí být chráněna před nečistotami, je možné měřit pouze povrchovou teplotu, chyby měření způsobené nejistotou stanovení emisivity měřeného objektu, prostupností prostředí a odraženým zářením z okolního prostředí. [14]



Obr.:2.1.12.: Blokové schéma měřícího řetězce bezkontaktních (bezdotykových) snímačů teploty [14]

## Tepelné senzory infračerveného záření



Obr.:2.1.13.: infračervený tepelný sensor [14]

**Princip:** při absorpci fotonů dochází k oteplení citlivé části senzoru a pohlcená energie se vyhodnocuje nepřímo přes dotykové senzory teploty. Samotné principy měření teploty jsou tedy obdobné jako u dotykových teplotních senzorů s tím rozdílem, že zde je teplo přenášeno ve formě infračerveného světla, které se zachytává na světlocitlivé ploše, která se tím zahřívá. [14]

**Použití:** měření změny teploty tělesa, detekce osob v zabezpečovacích systémech, tzv. PIR čidlo, CCD termovizní systémy, měření infračerveného záření velkých vlnových délek, tzn. nízkých teplot. [14]

**Typy tepelných infračervených senzorů:**

### Infračervené termočlánky

**Princip funkce:** citlivá snímací část senzoru je načerněna a někdy obsahuje optiku a zde právě dochází k absorpci zaostřeného infračerveného záření. Snímací plocha senzoru se tím zahřívá a jeho teplota je následně měřena termočlánky. [14]

**Typický měřicí rozsah:** od  $-100^{\circ}\text{C}$  až  $+500^{\circ}\text{C}$  dle typu použitých termočlánků a optiky. [14]

**Výroba:** sériově řazené termočlánky konstruované jako tenké kovové pásy (0,03 mm) nebo pásy zhotovené technologií tenkých vrstev nebo monolitickou technologií Si. Citlivá část senzoru je načerněna. [14]

**Použití:** pro levné a jednoduché bezdotykové měření a vyhodnocování, kde je možné použít standardní elektronické vyhodnocení jako pro klasické termočlánky. [14]



*Obr.:2.1.14.: Infračervený termočlánek [14]*

### **Bolometry**

**Princip funkce:** citlivá snímací část senzoru je načerněna a zde právě dochází k absorpci infračerveného záření a zahřívání snímací plochy senzoru, jehož teplota je následně měřena změnou vodivosti senzoru při změně zahřátí snímací části (termokonduktivní jev). [14]

**Typický měřicí rozsah:** vlnové délky infračerveného záření 1,6 až 500  $\mu\text{m}$  = teploty prakticky od -200°C až přes 1500°C [14]

**Výroba:** využívá se podobných materiálů jako u odporových senzorů teploty. Nejčastěji tenkovrstvé senzory MgO, MnO, NiO, TiO<sub>2</sub> atd. [14]



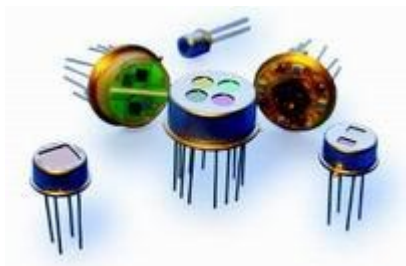
*Obr.:2.1.15.: Bolometr [14]*

## Pyroelektrické senzory

**Princip funkce:** princip je založen na tzv. pyroelektrickém jevu, tj. změně spontánní polarizace při změně teploty. Tím na povrchu materiálu, kam dopadá infračervené záření, vzniká el. náboj, který se dále měří. Tento jev vykazují pyroelektrika s trvalou polarizací a některá feroelektrika, u nichž se orientace vytvoří silným el. polem (např. TGS, PZT keramika,  $\text{LiTaO}_3$ , PVDF) [11]

**Typický měřicí rozsah:** vlnové délky infračerveného záření 5 až 14  $\mu\text{m}$  = teploty cca -50 až 400 °C.

**Výroba:** snímač tvoří 2 elektrody (jedna musí být transparentní pro záření) mezi nimiž je pyroelektrikum. Struktura podobná deskovému kondenzátoru. Při změně teploty, dojde ke změně polarizace a na elektrodách se indukuje el.náboj, který se elektronicky dále vyhodnocuje. Základní parametr je pyroelektrický koeficient, který právě udává změnu spontánní polarizace při změně teploty. [11]



Obr.:2.1.16.: Pyroelektrický sensor [11]

## Kvantové senzory infračerveného záření

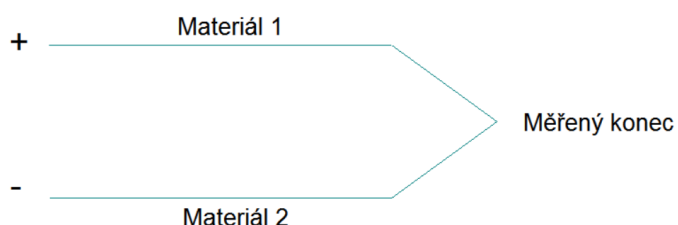
**Princip funkce:** využívá se fyzikálních jevů při přímé interakci dopadajících fotonů na strukturu senzoru. Využívá se polovodičových fotodiod a fotovodivostních detektorů pracujících v infračervené oblasti a obvykle v tzv. napěťovém režimu. Pro vysoké nároky odstupu signál-šum (SNR) je nutné senzory chladit. [6]

**Výroba:** využívá se velkého množství různých polovodičových materiálů, každý pro jiné pásmo vlnových délek infračerveného záření. Trend je využívat přechodu kov-polovodič. [6]

**Použití:** pro měření infračerveného záření krátkých vlnových délek, měření vysokých teplot v řádu tisíců °C. [6]

## 2.2. Měření pomocí termočlánu

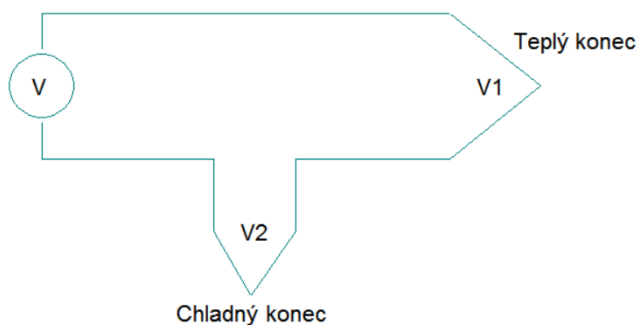
Pokud jsou na obou koncích spojeny dva vodiče z různého materiálu a jeden konec je zahříván, začne obvodem procházet konstantní proud. Po přerušení obvodu lze na volných koncích naměřit termoelektrické napětí. Tento jev platí pro všechny kovy. [1]



Obr.:2.2.1. Termoelektrický princip [1]

Termoelektrické napětí nelze měřit přímo. Musí se připojit do obvodu voltmetr, a tím se vytvoří nový termoelektrický obvod. [1]

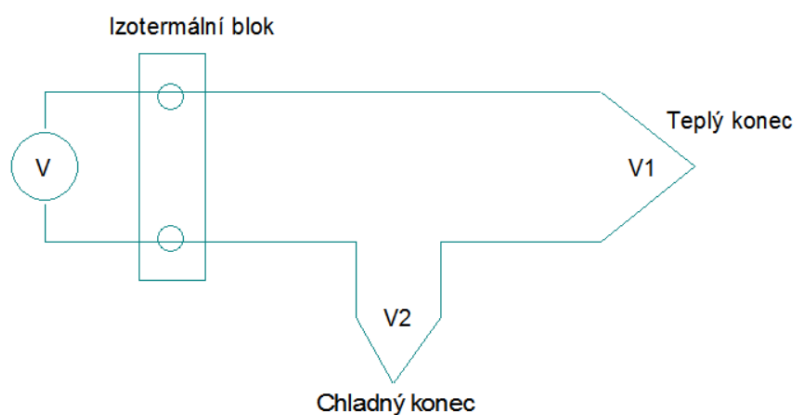
Možnost, jak eliminovat vliv spoje je použít referenční spoj. [1]



Obr.:2.2.2. Eliminace studeným koncem [1]

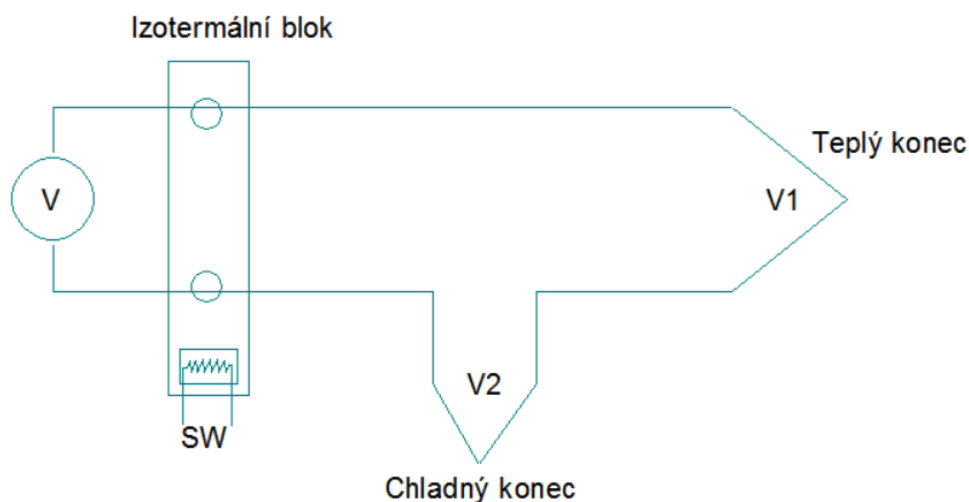
Výstupní napětí je dáno jako rozdílem napětí V1 a V2 vztah. Ten je úměrný rozdílu teplot ve spoji J1 a J2. Spoj J2 je udržován na 0°C. Je právě změna teploty úměrná změně napětí. Tato metoda je velmi přesná, protože bod ledu může být precizně řízen. [1]

Pro využití v praxi je nežádoucí se starat o tzv. „Ice Bath“ anglický termín pro ledovou lázeň, protože je to nepraktické. Proto led je nahrazen dalším izotermálním blokem. [1]



Obr.:2.2.3. Eliminace izotermálním blokem [1]

Další možností optimalizace je použití odporového snímače teploty neboli termistoru. Potom lze pomocí softwarové kompenzace zjistit skutečnou teplotu. [1]



Obr.:2.2.4. Eliminace softwarovou kompenzací [1]

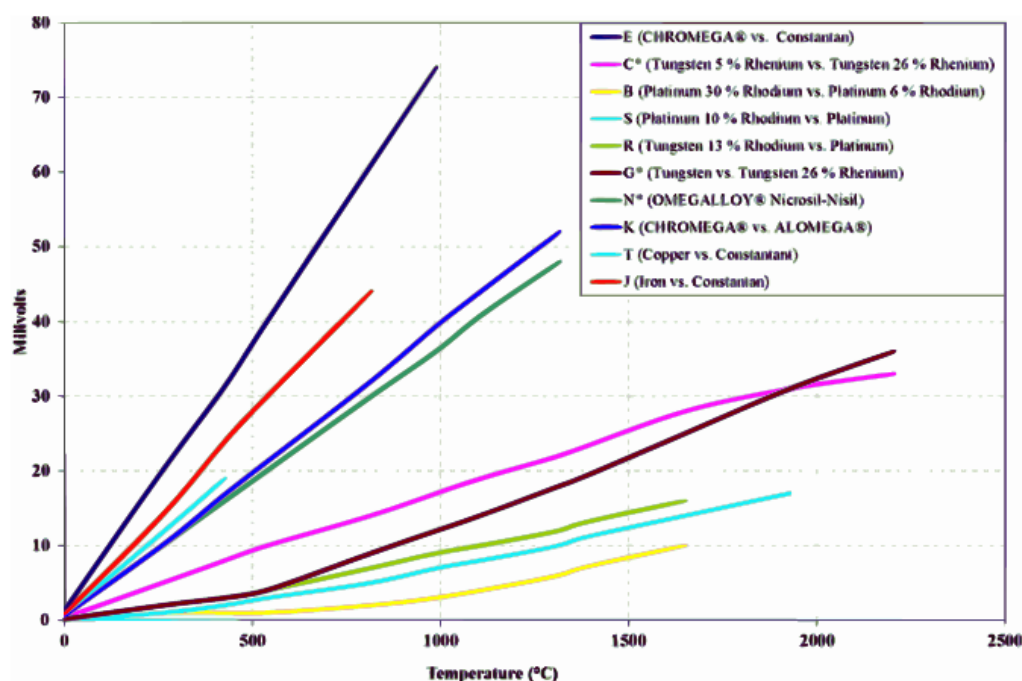
Termistor  $R_t$  poskytuje cestu k měření absolutní teploty referenčního spoje. Pomocí softwaru je využit následující algoritmus. Je změřeno napětí  $R_t$  pro nalezení teploty  $T_{ref}$  a pomocí teploty  $T_{ref}$  lze dopočítat napětí  $V_{ref}$ . Pokračujeme změřením napětí  $V$ . Napětí  $V$  je přičteno k napětí  $V_{ref}$  k nalezení  $V_1$ .  $V_1$  je přepočteno na teplotu  $T_{J1}$ .  $T_{J1}$  je měřená (skutečná) teplota. [1]

Otázkou je proč se zabývat termočládky, když již existují odporové snímače teploty? Je to z toho důvodu, že každý teplotní snímač je vhodný do určitého prostředí, rozhoduje i cena. Například termistor nelze použít pro účely měření jako je měření teploty ohřevu materiálu po průchodu laserovým paprskem, kde se teploty pohybují kolem  $500^\circ\text{C}$  a více. [1]

### Požadavky na termočládky:

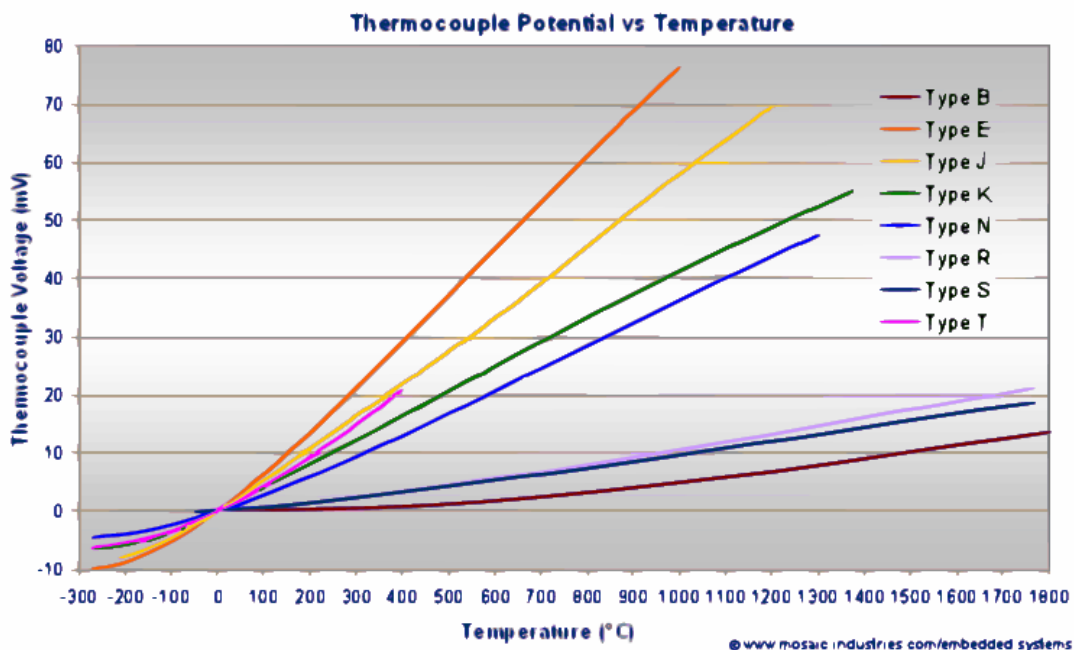
Existuje velké množství termočládků, kdy termoelektrické napětí vzniká při všech různých kombinacích materiálu při dané teplotě. [1]

- Požadavky instalace
- Chemická odolnost
- Odolnost proti abrazi a vibracím
- Teplotní rozsah



Obr.:2.2.5. Závislost termoelektrického napětí na teplotě pro různé typy termočládků [1]





Obr.:2.2.6. Závislost termoelektrického napětí na teplotě pro různé typy termočlánků [1]

### Výhody termočlánků

#### - Teplotní rozsah

Pokud je zvoleno dobrých sloučenin materiálů, lze se pohybovat v rozmezí  $-200^{\circ}\text{C}$  až  $+2500^{\circ}\text{C}$ . Proto se termočlánek využívá ve všech možných aplikacích, pokud je to možné. [1]

#### - Robustnost

Termočlánky jsou ve většině případů imunní vůči vibracím, proto je lze použít i v nehostinných aplikacích. [1]

#### - Rychlá odezva

Právě díky tomu, že termočlánky jsou rozměrově malé, mají malou termální kapacitu. To znamená, že termočlánky téměř okamžitě odpovídají skutečné teplotě. [1]

### Nevýhody termočlánků

#### - Komplexnost signálu

Je potřeba udělat velkou časovou investici v návrhu k zamezení chyb vzniklé nepřesnostmi. [1]

#### - Přesnost

Měření je právě jen tak přesné, jako je rychlost měření referenčního spoje. [1]

- **Náchylné vůči korozím**

Průběhem času mají termočlánky horší přesnost, proto je ochrana a údržba nezbytná. [1]

- **Náchylné vůči rušení**

Právě díky tomu, že jsou měřeny mikrovolty, můžou být termočlánky velice snadno rušeny elektrickými a magnetickými poli. Kroucením vodiče, lze potlačit magnetické pole přijímané z okolí. Užitím stíněného kabelu lze potlačit elektrické pole přijímané z okolí. [1]

## **Zpracování výstupního signálu**

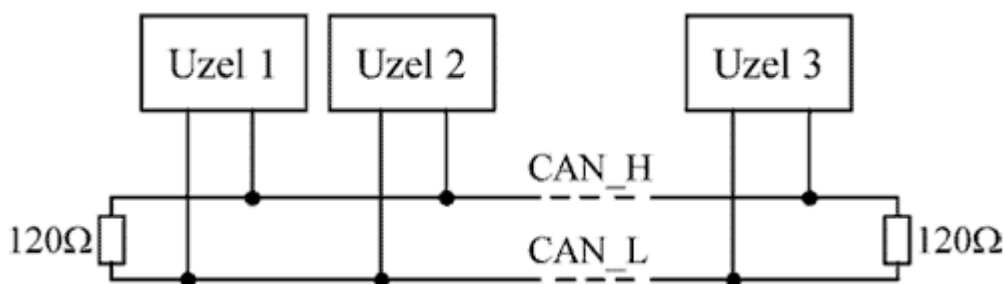
Problém nastává při využití výstupního signálu. Výstupní napětí termočlánku je příliš malé. Dalším problémem je nelineární vztah mezi napětím a teplotou. Dále je potřeba kompenzace referenčního spoje a můžou být problémy i se zemněním termočlánku. Kompenzace referenčního spoje už je výše vysvětlena. [1]

### 2.3.CAN komunikace

Koncem 80.let navrhla pro své potřeby německá firma Robert Bosch GmbH datovou komunikační síť pod názvem CAN (Controller Area Network). Původním záměrem byla především úspora kabeláže a zabezpečení přenosu informací mezi snímacími, řídicími a výkonovými prvky v automobilech. Vlastnosti, které nově definovaný systém zabezpečuje, mj. relativně vysoká rychlost přenosu, vysoká spolehlivost a odolnost při extrémních podmínkách (teplota, rušení apod.), nízká cena komunikačních obvodů, jsou pochopitelně výhodné, takže tento typ komunikační sítě nachází uplatnění i v dalších oblastech řídicí techniky. [2]

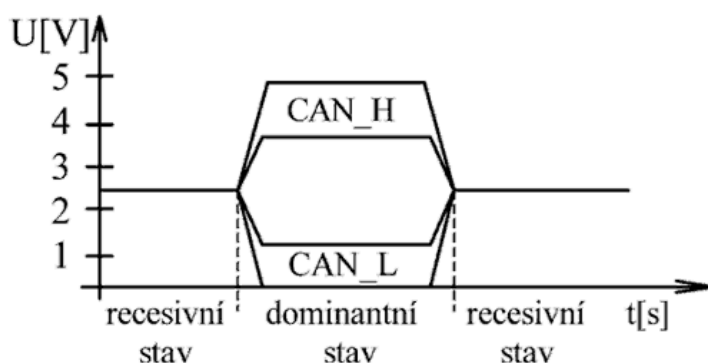
Datová komunikační síť CAN původně používala modifikované rozhraní RS 485, později bylo definováno normou ISO. Tato norma uvádí specifikaci elektrického rozhraní (fyzická vrstva) a specifikaci datového protokolu (linková vrstva). [2]

Přenosovým prostředkem je sběrnice tvořená dvou vodičovým vedením, jehož signálové vodiče jsou označeny CAN\_H a CAN\_L, a zakončovacími rezistory 120  $\Omega$ . K této sběrnici se připojují jednotlivé komunikační uzly. Počet těchto uzlů může být až 110. [2]



Obr.:2.2.1. Principiální zapojení CAN sběrnice [2]

Sběrnici se přenáší dva logické stavy: aktivní (dominant - dominantní) a pasivní (recessive - recesivní), přičemž dominantní stav představuje log.0., recesivní stav log.1. Sběrnice je v dominantním (aktivním) stavu, je-li alespoň jeden její uzel v dominantním stavu. V recesním (pasivním) stavu je sběrnice tehdy, když všechny její uzly jsou v recesním stavu. V recesním stavu je rozdíl napětí mezi vodiči CAN\_H a CAN\_L nulový, Dominantní stav je reprezentován nenulovým rozdílem napětí. Spínače signálových vodičů jsou konstruovány tak, aby v dominantním stavu na vodiči CAN\_H bylo napětí v rozsahu 3,5 až 5V, na vodiči CAN\_L napětí v rozsahu 0 až 1,5V. V recesivním stavu je napětí vodičů CAN\_H a CAN\_L stejné a je zajištěno odporovou sítí na vstupu přijímače. Na obr.2. je na časové ose průběhu signálu znázorněno toleranční pásmo napětíových úrovní logických stavů na sběrnici CAN. Je též patrné, že signálové vodiče CAN\_H a CAN\_L jsou vzájemně logicky invertované.

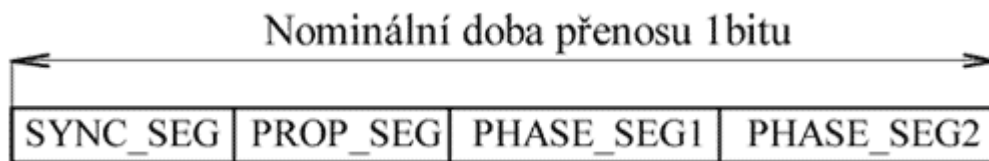


Obr.:2.2.2. Toleranční pásmo napětových úrovní logických stavů na sběrnici CAN [2]

Maximální rychlost přenosu je 1Mbit/s při délce sběrnice do 40m. Při délce 130m klesá na 500kbit/s, pro délku 560m na 125kbit/s a při délce 3,3km je její hodnota jen 20kbit/s. [2]

Komunikace na sběrnici CAN probíhá tak, že každý uzel může za určitých okolností využívat sběrnici pro vysílání svých zpráv. Zpráva vysílaná po sběrnici obsahuje identifikační číslo vysílajícího uzlu. Identifikátor definuje nejen obsah zprávy, ale i prioritu přístupu na sběrnici. Tímto způsobem je možno zaslat zprávu z jednoho uzlu do jiného uzlu nebo několik jiných uzlů současně. Komunikační síť CAN může pracovat jak v režimu multi-master (více nadřízených uzlů), nebo v režimu master-slave (jeden uzel nadřízený a více podřízených uzlů). [2]

Pro udržení synchronizace mezi uzly CAN během přenosu zpráv se používají změny úrovně signálu na sběrnici. Doba trvání jednoho informačního bitu se dělí na čtyři časové segmenty obr.3. Každý segment se dělí na časová kvanta. Během SYNC\_SEG se očekává hrana signálu. PROP\_SEG slouží ke kompenzaci doby šíření signálu po sběrnici. PHASE\_SEG1 a PHASE\_SEG2, mezi kterými se nachází vzorkovací bod stavu sběrnice, se využívají ke kompenzaci fázových chyb na sběrnici. Je-li očekávána hrana signálu mimo SYNC\_SEG, mění se jejich délka o programovatelný počet časových kvant. Aby se tento způsob kompenzace mohl realizovat bez vlivu na obsah přenášených zpráv, je použita metoda doplnění bitů opačné polarity. Obsahuje-li zpráva 5bitů se stejnou polaritou, zařadí se automaticky do řetězce bitů bit s opačnou polaritou, který se na přijímací straně opět vyřadí. [2]



Obr.:2.2.3. Přenos jednoho bitu CAN [2]

Komunikační protokol CAN definuje formát přenášených zpráv na aplikační úrovni. Zprávy jsou přenášené v tzv. rámcích. V definici CAN jsou určeny čtyři typy rámců: [2]

- datový rámec (DATA FRAME)
- žádost o data (REMOTE FRAME)
- chybový rámec (ERROR FRAME)
- rámec přeplnění (OVERLOAD FRAME)

#### **Datový rámec (DATA FRAME)**

Datový rámec zabezpečuje přenos informací z vysílajícího uzlu všem ostatním uzlům na sběrnici. Tento rámec se skládá z následujících částí. [2]

#### **Žádost o rámec (REMOTE FRAME)**

Žádost o rámec má obdobný formát jako datový rámec. Neobsahuje však datové pole a bit RTR je recesivní (v datovém rámci je dominantní). Uzel takto žádá některý jiný uzel na síti o vysílání datového rámce se shodným identifikátorem, jaký je v žádosti. [2]

#### **Chybový rámec (ERROR FRAME)**

Chybový rámec sestává z polí ERROR FLAG a ERROR DELIMITER. Uzel, který zjistí chybu v řetězci přijímaných bitů, začne vysílat 6 dominantních bitů, čímž poruší strukturu rámce. Ostatní uzly začnou též vysílat 6 dominantních bitů. Celková délka ERROR FLAG tak může být 6 až 12 bitů. Za nimi následuje pole ERROR DELIMITER s 8 recesivními bity. [2]

#### **Rámec přeplnění (OVERLOAD FRAME)**

Rámec přeplnění má obdobnou strukturu, jako chybový rámec. Uzel vyšle tento rámec především tehdy, když potřebuje určitý čas na zpracování předchozí zprávy. [2]

#### **Výhody CAN**

- Vysoká rychlost přenosu dat 1Mbit/s při délce sběrnice do 40m
- Rozlišení zpráv identifikátorem CAN 2.0A 11bitů a CAN 2.0B 29bitů
- Selektce přijímaných identifikátorů zpráv
- Prioritní přístup zabezpečující urychlené doručení významných zpráv
- Diagnostika sběrnice např.: chyba doručení zprávy, chyba CRC, přetečení bufferu
- Značná úroveň zabezpečení přenosu
- Vysoká provozní spolehlivost
- Stále se rozšiřující součástková základna
- Nízká cena

#### **Nevýhody CAN**

- Omezený počet dat přenášených v rámci jedné zprávy (0 až 8 Byte)
- Prvotní náročnost nastavení registrů CAN sběrnice

## Prvky protokolu CAN

Jedním ze stěžejních prvků CAN je chybové zabezpečení. V protokolu se uvažuje s následnými prvky:

- Monitorování sběrnice
- Kontrola cyklickým kódem
- Kontrola vyrovnávacích bitů
- Kontrolní zpráva

Všechna kontrolní místa tak sledují komunikace a podle povahy zajišťují přerušení komunikace, opakování zprávy nebo generaci chybového protokolu. V případě opakování chyb z uzlu je možné jeho odstavení od komunikace. Těmito opatřeními je zajištěna pravděpodobnost výskytu chyby v matematickém vyjádření v úrovni  $4,7 \times 10^{-11}$ . [10]

## Informační bloky protokolu CAN

Je na čase podívat se na konkrétní fungování systému. Komunikace mezi jednotlivými uzly se odehrává formou předávaných zpráv. Datová zpráva nese informace o adresátu zprávy, datovou informaci a chybovou funkci. Pokud je sběrnice volná, může jakýkoliv uzel vyslat zprávu k jinému adresátu. Je možný i přenos do více uzlů. V případě vyslání zpráv z více uzlů současně, je komunikace zajišťována podle priority uložené v adresní části zpráv. Při tom žádná ze zpráv není ztracena, pouze se počká na volnost sběrnice. Zvláštním druhem je dotazová zpráva spočívající v předání požadavku na příslušný uzel, který v odpovědi předá požadovaná data. Opět v případě současného odeslání zprávy a požadavku na data má při shodné prioritě přednost zpráva datová. [10]

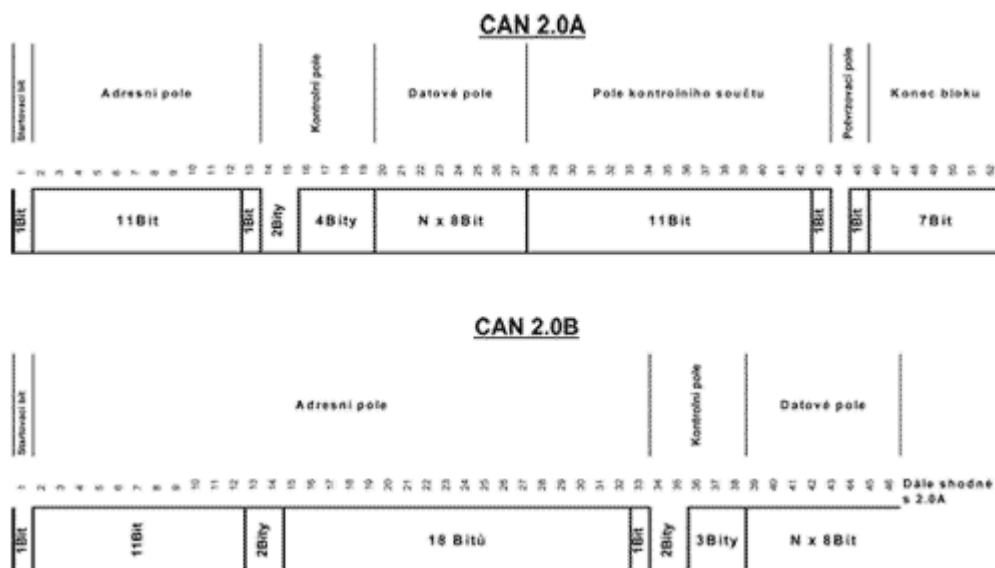
V protokolu CAN 2.0 rozeznáváme čtyři základní bloky dat, se kterými se postupně seznámíme.

- Datový blok – přenáší datové informace
- Požadavkový blok – předává požadavek na přenos dat
- Chybový blok – přenáší se při identifikaci chyby na lince
- Zpožďovací blok – generuje zvláštní zpoždění vkládané do předchozích bloků

[10]

## Datový blok

Na struktuře datového bloku si představíme základy CAN protokolu verze 2.0A. Sekvence bitů je naznačena na následujícím obrázku. [10]



Obr.:3.4.1.: Datový blok [10]

## 2.4.Zpracování analogových informací

### Charakteristika analogových vstupů

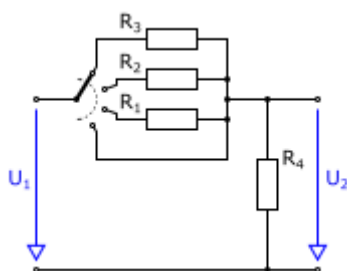
Analogové vstupy převádí vnější spojitý elektrický signál na diskrétní číselné vyjádření jeho hodnoty ... analogově-digitální převodník, ve zkratce A/D převodník. Vstupními signály pro zpracování v PLC jsou napětí (U) a proud (I), tj. základní veličiny, odvozenou veličinou, kterou je možno měřit je elektrický odpor (R). Měření hustoty, tlaku, teploty, vodivosti, viskosity apod. je realizováno snímacím členem (čidlem), který převádí informaci o měřené fyzikální veličině na veličinu elektrickou. [8]

### Velikost a rozsah analogových signálů

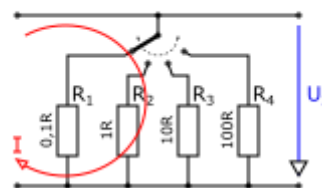
Standardní signály pro měření v regulačních obvodech jsou napětí (0 ... 10V, -10V ... +10V) a proud (0 ... 20mA, 4 ... 20mA, -20mA ... +20mA), analogové signály unipolární (nabývají pouze kladné hodnoty) i bipolární (nabývají kladné i záporné hodnoty). Vstupní analogové jednotky se vyrábějí i s dalšími měřicími rozsahy, které jsou určeny pro měření teploty (termočlánky, termometry, Pt100) případně pro jiné využití. [8]

### Úprava vstupního rozsahu analogového signálu

Čip (např. integrovaný monolitický obvod) vstupního analogového převodníku má fyzicky jeden univerzální vstup pro všechny měřené veličiny, obvykle  $\pm 1V$  nebo 0-1V. Typ, rozsah a způsob měření dané veličiny se určuje vstupním analogovým obvodem, realizovaným odporovým děličem, kombinací odporů tak, aby byl předpokládán rozsah analogového signálu upravena na hodnotu, kterou je analogový převodník schopen zpracovat. I měření proudu, je realizováno měřením napětí na zatěžovacím odporu vstupního obvodu analogového modulu (Ohmův zákon). V některých případech je analogový modul vybaven pomocným proudovým nebo napěťovým zdrojem pro napájení pasivních analogových komponent například k měření odporu, teploty. [8]



Obr.:2.4.1.: Odporový dělič s přepínáním rozsahů pro měření napětí. [8]

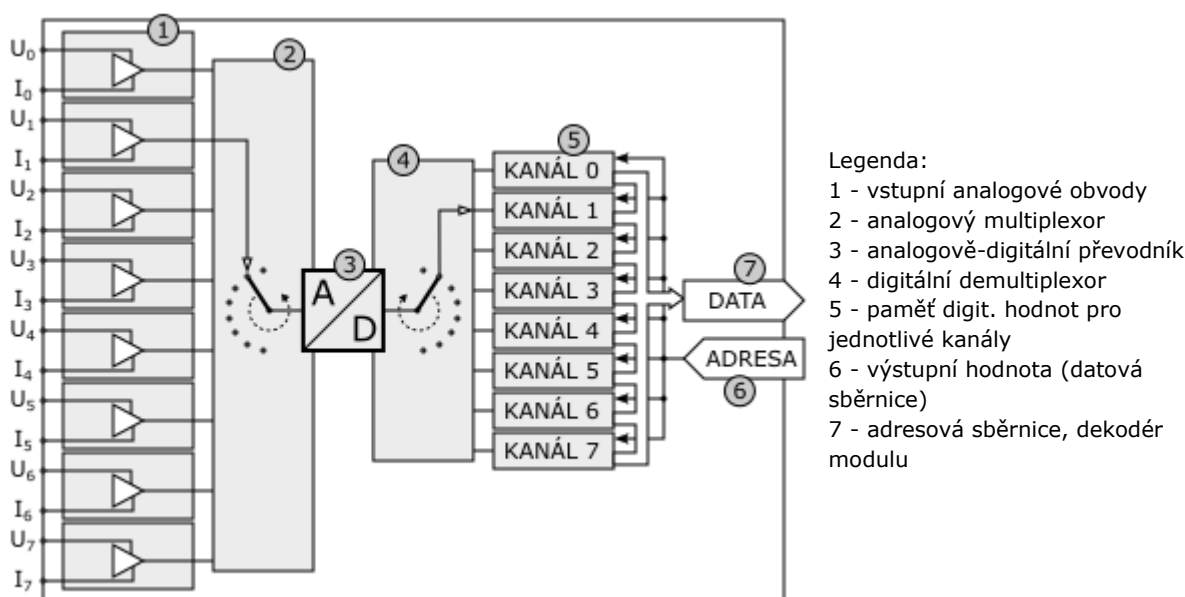


Obr.: 2.4.2.: Odporové bočníky s přepínáním rozsahu pro měření proudu. [8]



## Modul analogových vstupů

V modulu periferie analogových vstupů bývá pouze (minimálně) jeden převodník A/D, z důvodu ceny i úspory místa a pokud je modul určen pro zpracování více analogových signálů (např. 2, 4, 8), je A/D převodník doplněn analogovým multiplexorem, pomocí něhož se jednotlivé vstupní signály, připojují k A/D převodníku ale vždy se připojuje pouze jeden analogový signál (kanál). Použití multiplexoru zlevňuje vícekanálový analogový modul, protože postačí jeden (dražší) analogově-digitální převodník. Na druhou stranu se prodlužuje doba obsluhy převodu všech analogových signálů, protože se zpracovávají postupně.



Obr.: 2.4.3.: Principiální schéma modulu A/D převodníku pro 8 kanálů. [8]

Analogové hodnoty jsou přiváděny do vstupních obvodů (1) jednotlivých kanálů, kde jsou přizpůsobeny ke zpracování v převodníku. Analogový multiplexor (2) postupně připojuje jednotlivé kanály k analogově-digitálnímu převodníku, který analogovou hodnotu převede na digitální. Následující demultiplexor (4) přiřadí přivedenou digitální hodnotu do mezipaměti kanálu (5), pro který se provádí převod. PLC potom přistupuje k hodnotám jednotlivých kanálů tak, že nastaví adresu modulu a adresu kanálu (dolní 3 bity pro 8 kanálový převodník) a na datové sběrnici obdrží číselnou hodnotu konkrétního analogového signálu. [8]

## Vzorkování hodnoty z A/D modulu

Vzorkování analogového signálu je složitější a časově náročnější než vzorkování signálu digitálního, tedy je obtížné se přiblížit době cyklu PLC tak, aby byla vždy načtena právě aktuální hodnota analogového signálu. Tato situace se řeší dvěma způsoby a je vhodné přihlídnout i k tomu, jak rychle se může sledovaný analogový signál reálně měnit. [8]

## Dotazování na hodnotu

Princip je takový, že CPU vyšle přímým přístupem požadavek na periférii ke zjištění analogové hodnoty. Periferie provede převod konkrétního analogového signálu (kanálu) na digitální hodnotu a tuto odešle zpět do CPU. Do CPU se tedy dostane právě aktuální hodnota analogového signálu, což je sice požadovaný stav ale při čtení hodnoty na vyžádání dochází k pozastavení běhu programu v CPU, kdy se čeká na odpověď periferie a vrácení číselné hodnoty, tedy dochází k prodloužení doby cyklu. S narůstajícím počtem čtených analogových signálů může být takové prodloužení doby cyklu nežádoucí. [8]

## Cyklické čtení hodnoty

Cyklické čtení hodnoty nezatěžuje dobu cyklu PLC, ale není zaručeno, že v každém cyklu PLC bude zpracována právě aktuální hodnota analogového signálu. Vstupní analogová periferie provádí vlastní cyklus čtení analogových hodnot, tyto ukládá do zásobníku a při aktualizaci vstupů do CPU poskytuje hodnoty, které má právě k dispozici. Vzhledem k zvyšování rychlosti taktu (frekvence) pro řízení mikročipů jsou analogové periferie dostatečně rychlé, aby bylo možno reálně pracovat i s takto získanými hodnotami. Taktéž bývá možno na periférii nastavit kolik analogových signálů (označovány jako kanály) má být vzorkováno vlastním cyklem periferie a tím interní cyklus převodu zkrátit. [8]

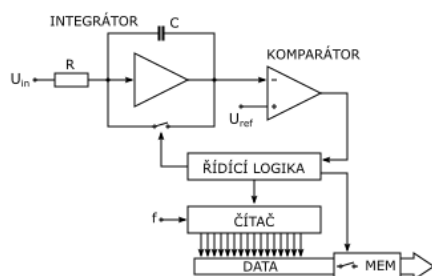
## Převod analogového signálu

Převod analogového signálu na hodnotu zpracovávanou v PLC je složitější než u digitálního signálu, který má konečný počet stavů. Analogový signál může nebývat libovolných hodnot z daného rozsahu. Z tohoto důvodu je nutno analogový signál převádět minimálně na číslo velikosti slova (integer), vyjadřující velikost analogového signálu. [8]

## Integrační metoda

### A/D převodník s jednoduchou integrací

Integrační metoda je založena na měření doby (čítání) za jakou se nabije kondenzátor na požadovanou hodnotu ( $U_{ref}$ ) přivedeným vnějším (měřeným) signálem  $U_{in}$ . Číselná hodnota je potom nepřímo úměrná době nabíjení kondenzátoru. Tyto převodníky jsou levné ale méně přesné a pomalé. [8]

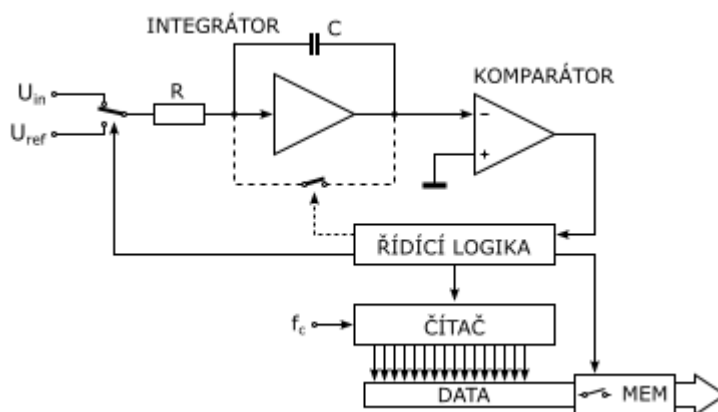


Obr.: 2.4.4.: Principiální schéma převodníku s jednoduchou integrací [8]

Převodník pracuje tak, řídicí logika prvně provede vybití kondenzátoru integrátoru, vynulování čítače a po této operaci je zahájeno nabíjení kondenzátoru. Doba, po jakou se kondenzátor nabíjí na hodnotu danou napětím  $U_{ref}$ , je zaznamenávána v čítači impulsů. Frekvence  $f$ , přiváděná do čítače po dobu měření musí být konstantní. Jakmile napětí na kondenzátoru dosáhne referenčního napětí, je tento stav zaznamenán komparátorem a předán do řídicí logiky. Řídicí logika provede zápis stavu čítače do pomocné paměti (MEM) a cyklus se opakuje. Pokud se kondenzátor nenabije na hodnotu  $U_{ref}$ , dříve než dojde k naplnění čítače na maximální hodnotu, je napětí na vstupu pod rozlišovací hodnotou převodníku, eventuálně nulové. Pokud dojde k okamžitému nabití kondenzátoru na hodnotu  $U_{ref}$ , ještě před nebo s první změnou hodnoty čítače, je vstupní napětí  $U_{in}$  vyšší než rozsah převodníku. [8]

### A/D převodník s dvojitou integrací

Integrační metoda s použitím dvojitě integrace vychází z předchozího případu, rozdíl je v tom, že se provádí integrace jak při nabíjení kondenzátoru, tak i při jeho vybíjení (není vybit skokově) a měří se doba, za kterou klesne napětí integračního členu k referenční hodnotě. Realizace dvojitě integrace je o málo složitější než při jednoduché integraci, přináší však výhodu v tom, že je kompenzována chyba časová chyba RC členu a nestabilita čítecí frekvence. [8]

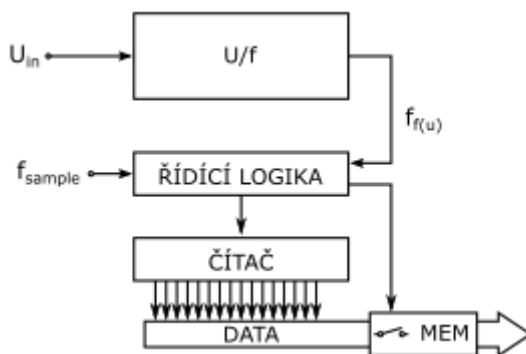


Obr.: 2.4.5.: Principiální schéma převodníku s dvojitou integrací [8]

V první fázi se nastaví čítač na maximální hodnotu (111...111b). Následně se zahájí nabíjení kondenzátoru integrátoru přivedením napětí  $U_{in}$  a probíhá odečet (dekrementace) hodnoty čítače o 1 (směrem k nule) konstantní frekvencí  $f_c$ . Doba nabíjení kondenzátoru je dána dobou, dokud není čítač odečtem vynulován. Ve stavu, kdy je čítač vynulován, je zahájena druhá integrace. Vstup integrátoru je přepnut na referenční napětí  $U_{ref}$ , zahájí se vybíjení kondenzátoru a čítač je inkrementován frekvencí  $f_c$  až do té doby, než dojde k úplnému vybití kondenzátoru zaznamenané komparátorem. Obsah čítače (počet zaznamenaných impulsů v době vybíjení) pak odpovídá velikosti měřeného napětí  $U_{in}$ , a hodnota je zapsána do pomocné paměti MEM. Dále se cyklus opakuje. Je nutno vzít v úvahu, že při měření kladných napětí musí být  $U_{ref} \leq 0 < U_{in}$  a naopak. Při  $U_{ref} = 0$  V je možno měřit kladná i záporná napětí. Pokud je vstupní napětí  $U_{in}$  příliš malé (pod  $U_{ref}$ ) nebo nulové, je čítání zastaveno hned na začátku druhé fáze. Pokud je vstupní napětí  $U_{in}$  vyšší než povolený rozsah, dojde při vybíjení kondenzátoru v druhé fázi k přetečení čítače. Nucené okamžité vybíjení kondenzátoru již není nutné. [8]

## Metoda U/f

Metoda měření analogového signálu pomocí převodníku U/f je podobná integrační metodě, rozdíl je v tom, že se neměří doba za kterou se nabije/vybije kondenzátor, ale měří se kolikrát dojde k tomuto cyklu v daném časovém intervalu. převodník U/f (obecně oscilátor řízený napětím) zpravidla pracuje tak, že jeho výstupní frekvence je úměrná vstupnímu napětí  $U_{in}$ . V pravidelných intervalech ( $f_{sample}$ ) je odečítána hodnota čítače frekvence. Převodník tohoto provedení je vcelku jednoduchý a levný, nevýhodou je možná nelinearita převodu U/f a možná vyšší teplotní závislost. [8]



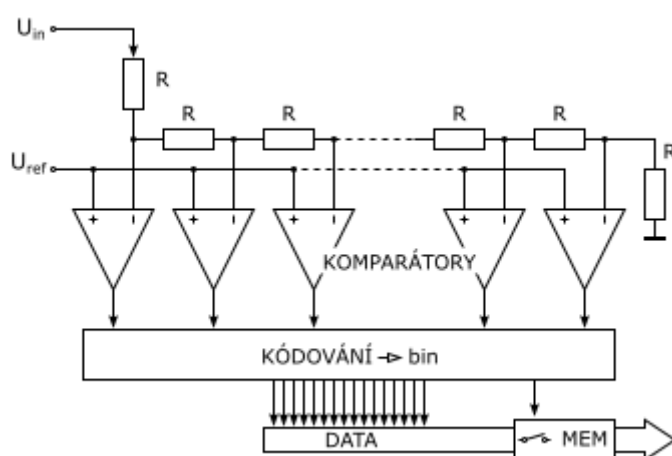
Obr.: 2.4.6.: Principiální schéma převodníku využívající řízení frekvence oscilátoru[8]

Převodník pracuje tak, že je prvně vynulován čítač impulsů a poté je zahájeno čítání. Čítač zaznamenává počet impulsů (frekvenci), který je úměrný velikosti měřeného napětí. S hranou vzorkovací frekvence je obsah čítače převeden do pomocné paměti (MEM) a cyklus se opakuje. [8]

## Komparační metoda

### A/D převodník s paralelní komparací

Přímá komparační metoda využívá zapojení kaskády několika komparátorů, kdy se každý komparátor překlápí při jiné hodnotě (dáno kaskádou odporového děliče) vstupního napětí  $U_{in}$  proti referenčnímu napětí  $U_{ref}$ . Jinými slovy, počet "překlopených" komparátorů odpovídá velikosti vstupního napětí. Stav komparátorů je potom logikou převeden na číslo odpovídající velikosti napětí. Velkou výhodou je nejrychlejší možná reakce převodníku, respektive nejkratší možný dosažitelný čas převodu analogového signálu do číselní podoby. Bohužel, velkou nevýhodou je extrémní náročnost na realizaci ve smyslu počtu nutně použitých komparátorů. Prakticky je takový převodník použitelný pouze pro velmi úzký rozsah měření, pokud budeme chtít docílit únosné přesnosti. [8]

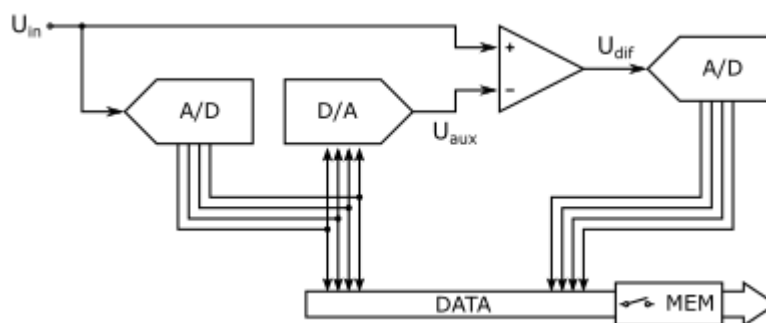


Obr.: 2.4.7.: Principiální schéma převodníku s komparátory [8]

Příklad: Při rozsahu vstupní napětí 0-10V je s jedním komparátorem možno detekovat např. stav  $\leq 5V$  nebo  $> 5V$ . S použitím tří komparátorů je již možno indikovat stav v kroku 2,5V. S použitím 7 komparátorů pak v kroku 1,25V a tak dále .... Tedy pro dosažení rozlišení, které by bylo použitelné pro měření je potřeba  $2^n - 1$  komparátorů, konkrétně pro (pouze) 8 bitový převodník se jedná o 255 komparátorů. [8]

### A/D převodník s postupnou komparací

Převodník s postupnou komparací je odpovědí na snahu snížení počtu velkého množství komparátorů se zachováním výhody rychlého převodu. I přes toto řešení, obsahuje 8 bitový A/D převodník stále 30 komparátorů. Realizace takového převodníku představuje rozdělení celkového převodníku do dvou skupin obsluhující vyšší a nižší bity výstupního slova. [8]

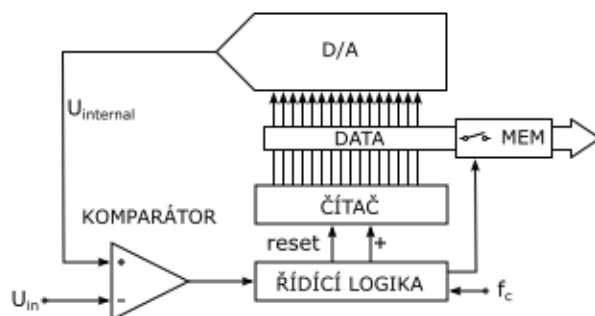


Obr.: 2.4.8.: Principiální schéma převodníku s postupnou komparací [8]

První skupina pomocí 4 bitového převodníku hrubě určuje rozsah vstupního signálu a prezentuje jej na vyšších bitech datového slova. Tyto bity jsou dále využity pro generování pomocného napětí  $U_{aux}$  v D/A převodníku, které se odečte od vstupního napětí  $U_{in}$ . Tímto se sníží vstupní napětí  $U_{in}$  na napětí  $U_{dif}$ , které je dalším A/D převodníkem zpracováno a výsledek je reprezentován na nižších bitech datového slova. Napětí  $U_{dif}$  je vždy v rozsahu odpovídající podílu rozlišení prvního převodníku, v tomto případě  $1/2n = 1/24 = 1/16$ . [8]

## Kompenzační metoda

Kompenzační metoda porovnává velikost měřeného analogového signálu  $U_{in}$  s interně generovaným analogovým signálem a řídicí logika dorovnává interní napětí převodníku k napětí vstupnímu (měřenému)  $U_{in}$ . Prakticky je vstupní (měřené) napětí referenčním, ke kterému se hledá interní napětí převodníku. Vzájemná velikost napětí je vyhodnocována komparátorem. Řídicí logika postupně generuje interní hodnotu (číslo) pro D/A převodník, jehož výstup je porovnán se vstupním napětím. [8]



Obr.: 2.4.9.: Principiální schéma kompenzačního převodníku [8]

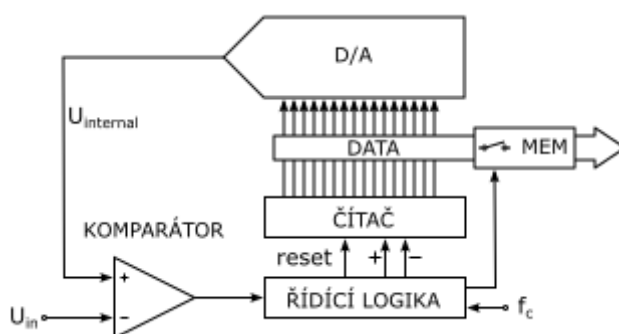
Podle způsobu generování číselné kombinace je možno realizovat následující případy převodníků. [8]

### Čítací kompenzační A/D převodník

Čítací převodník je nejjednodušší variantou řešení nalezení hodnoty vstupního napětí. Na začátku cyklu je vynulováno datové slovo a D/A převodník generuje napětí 0V. Postupně se zvyšuje hodnota datového slova, vždy o +1 (inkrementace) a tím se zvyšuje napětí na výstupu D/A převodníku. Jakmile toto napětí dosáhne úrovně měřeného napětí, překlopí se komparátor a zastaví se zvyšování hodnoty datového slova a jeho hodnota je přenesena do výstupní paměti MEM. Potom se cyklus opakuje. [8]

### Sledovací kompenzační A/D převodník

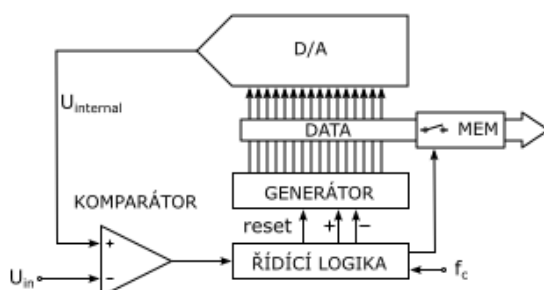
Kompenzační sledovací převodník v první fázi nabíhá na hodnotu stejně jako převodník čítací. Po nalezení shody mezi interním napětím a měřeným napětím neprovádí vynulování datového slova, ale pouze hodnotu přepíše do výstupní paměti MEM. Dále se chová tak, že podle stavu komparátoru dále přičítá nebo odečítá hodnotu 1 z datového slova tak, aby průběžně dorovnával interní napětí k měřenému napětí, a to podle stavu komparátoru, kdy přičítá nebo odečítá hodnotu 1 v datovém slově. Vzhledem k tomu, že převodník s jedním komparátorem nemůže dosáhnout klidového stavu, dochází k trvalé změně na hodnoty 0 - 1 - 0 - ... na nejnižším bitu. Tento bit pak nemusí být předáván jako část výstupního datového slova. Při použití dvou komparátorů s odporovým děličem je možno nastavit malou diferenci napětí (citlivost), na kterou převodník nereaguje a datové slovo se nemění (vynechání nejnižšího bitu vyjde levněji ale zhorší se přesnost). [8]



Obr.: 2.4.10.: Principiální schéma sledovacího kompenzačního převodníku [8]

### Aproximační kompenzační A/D převodník

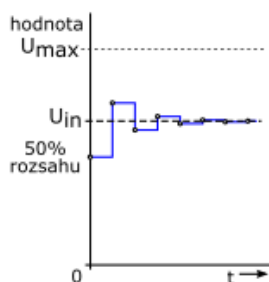
Pokud se začíná s generováním stavu v jednom z možných krajních stavů minimum/maximum (příklady výše), závisela by doba převodu na tom, jak velká je velikost vstupního napětí, je-li blíže k minimální nebo blíže k maximální hodnotě. Korekci tohoto stavu je použití aproximační metody půlení intervalu, kdy generátor v řídicí logice vytváří kombinační posloupnost pro D/A převodník. [8]



Obr.: 2.4.10.: Principiální schéma aproximačního kompenzačního převodníku [8]

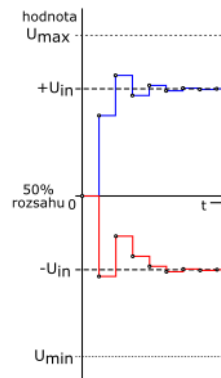


Při zahájení převodu řídicí logika v prvním kroku "zkusmo" nastaví interní rozsah na 50% (např. 5,88V pro nominální rozsah 0-10V), což je aktivace nejvyššího významového bitu v datovém slově. Pokud je interní napětí nižší než vstupní, řídicí logika aktivuje další (nižší) bit a tím "přidá" 25% rozsahu, pokud je interní napětí stále nižší, opakuje se situace na dalším nižším bitu (rozsah 12,5%) atd... Pokud po poslední aktivaci je interní napětí vyšší než napětí vstupní, řídicí logika vrátí stav zpět, tedy vypne poslední aktivovaný bit a aktivuje další nižší bit (rozsah 12,5%) a celý cyklus porovnání se opakuje až se vyčerpají možné kombinace až k nejnižšímu bitu. Pak je převod ukončen a interní číselná hodnota upravena do tvaru čísla integer a předána do výstupní paměti MEM. [8]



Obr.: 2.4.11.:

*Průběh interního napětí pro unipolární signál [8]*



Obr.: 2.4.12.:

*Průběh interního napětí pro bipolární signál [8]*

## Vyjádření hodnoty analogového signálu

Hodnota analogového signálu se obvykle vyjadřuje číslem velikosti slova, tedy 16. bitů, charakteru integer. [8]

### Přesnost převodníku

Uvážíme-li velikost obvyklého čísla integer v binární soustavě v rozsahu -32.768 ... +32.767 dostaneme limitní přesnost, s jakou je možno vyjádřit hodnotu analogového signálu, tj. rozsah 15 bitů + znaménko. V praxi se však málo využívá nejnižší bit slova (20), proto je maximální přesnost ještě poloviční, do měření dále vstupuje chyba převodníku, zákmity, šum. [8]

Využitelný rozsah čísla integer ještě neznamená, že signál bude změřen s maximální možnou přesností, kterou je možno vyjádřit na zbylých 14 bitech. Z důvodu nižší ceny analogových modulů se vždy nevyužívá všech možných 14 bitů slova (+ znaménko + nejnižší bit = 16) ale pouze ty nejvyšší, tedy používají se i levnější převodníky, které mají aktivních pouze 12, 10, 8 bitů (čím méně bitů, tím nižší přesnost), přitom tyto bity jsou do výstupního slova vkládány od 15. bitu (214) směrem k nižším bitům, (16 bit je znaménko). Zbylé, nevyužité, bity až k 1. bitu (20) jsou ve slově pevně nastaveny na hodnotu 0 (nula). Toto řešení je důležité z toho důvodu, že potom je stejná velikost analogového signálu vždy vyjádřena stejnou hodnotou na nejvyšších bitech slova a odchylka nastává až na nižších bitech podle počtu využitých bitů-přesnosti převodníku. V tabulkách dále je pracováno se šířkou slova 16 bitů včetně znaménka. [8]

## **Číselný rozsah hodnoty analogového signálu**

Aby byla situace ještě trochu komplikovanější, neodpovídá maximální hodnotě analogového signálu maximální číselné vyjádření. Aby bylo možno zpracovat signál o velikosti např. 10V musí mít převodník měřící rozsah větší, než je uváděn jako nominální. Tím je možno zjistit hodnotu signálu, která je vyšší než nominální, pokud je překročení nominální hodnoty malé, je hodnota převodu stále správná, a to ještě i s požadovanou přesností měření a linearitě. Při vyšším překročení rozsahu již nelze zaručit přesnost měření ale číselná hodnota ještě mění svoji velikost podle změny signálu. Pokud je analogový signál příliš velký-kladný, dojde k přetečení (nebo k podtečení-záporný), tedy nastane takový stav, kdy převodník již nemůže číselně sledovat analogový signál. Při dalším zvýšení analogového signálu dojde k destrukci měřících obvodů. [8]

Standardně je nominální velikost analogového signálu vyjádřena číselnou hodnotou 0 ... +27.648 u unipolárního a -27.648 ... +27.648 u bipolárního analogového signálu slova integer se znaménkem proto, aby bylo možno číselně vyjádřit i přeběh vstupního analogového signálu, což je případ, kdy je velikost analogového signálu větší, než je nominální rozsah převodníku. [8]

## **Reprezentace hodnot analogového signálu**

Jak je uvedeno v části "úprava vstupního analogového signálu" (viz výše) je používán jeden univerzální vstup a z toho vyplývá, že převodník vždy zpracovává stejný číselný rozsah 0 ...100% (unipolární) nebo -100% ... +100% (bipolární) se stejným číselným výstupem bez rozdílu měřené veličiny. Skutečná velikost měřené veličiny pak odpovídá nastavení nebo volbě vstupních analogových obvodů před analogovým převodníkem. [8]

## **Přerušení**

Podle typu analogové vstupní periferie je možno zadat podmínky, za jakých má periferie požádat o přerušení, které může být procesní (dosažení přednastavených limitních hodnot) nebo diagnostické (přerušení proudové smyčky, analogový signál je mimo povolený rozsah, výpadek napájení, interní chyba atd.). [8]

## **Diagnostika**

Některé vstupní i výstupní jednotky umožňují vnitřní diagnostiku jako je poškození nebo přetížení. Lze diagnostikovat externí závady jako je zkrat nebo přerušení vodičů signálů, výpadky napájení atd., záleží však na typu měřené veličiny. [8]

## **Galvanické oddělení**

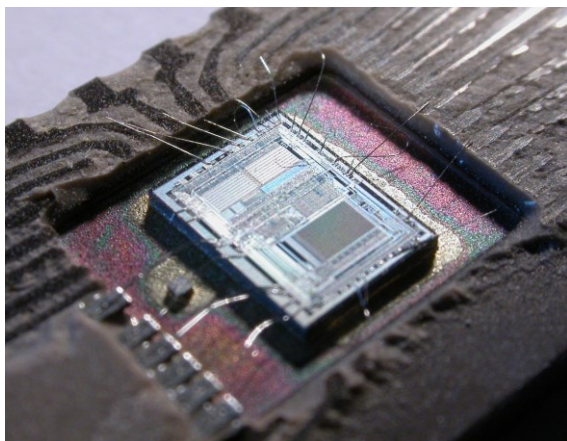
Dřívější jednotky periférií byly vyráběny v provedení jako galvanicky vázané nebo galvanicky oddělené. Důvodem byla cena oddělovacích optoelektrických členů potřebných pro galvanické oddělení, v současné době je galvanické oddělení realizováno minimálně na úrovni oddělení interní sběrnice PLC od procesních signálů. Vyrábějí se i jednotky, které mají oddělení jednotlivých signálů, častěji se však jedná o oddělení skupin signálů. [8]

## 2.5.Úprava digitálních informací

### Mikrokontroléry

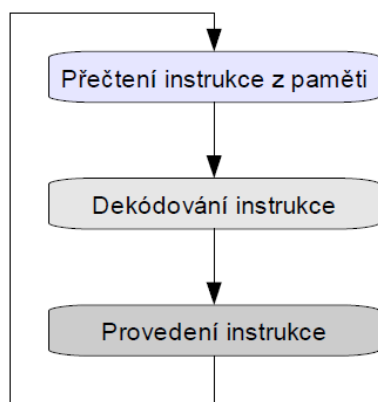
Úspěchy ve zvyšování stupně integrace vedly v 70 letech minulého století ke konstrukci prvního mikroprocesoru. A tak byl 15.listopadu 1971 firmou INTEL představen první mikroprocesor na světě, se skromným označením 4004. Vývoj od toho roku 1971 byl obrovský, a to jak v technologické oblasti a v parametrech, ale i filozofie aplikací se rozšířila do směrů dříve netušených. To však sebou nutně přináší potřebu pojmenovávat nové, abychom byli schopni se dorozumět. A tak se setkáváme v zásadě se třemi pojmy: [9]

- **Mikroprocesor** – je svému předkovi v principu nejbližší. Dnes je základem počítačů a bez pamětí a podpůrných obvodů prakticky není schopen samostatné činnosti. Jeho hlavní charakteristika je úplný soubor instrukcí a Neumannova architektura. [9]
- **Jednočipový mikropočítač** – vznikl na základě myšlenky integrovat do jedné součástky všechno potřebné tak, aby byl schopen samostatné funkce, nejvýše s několika pasivními součástkami okolo. V případě potřeby je však možné rozšíření např. o přídavnou RAM paměť. Jeho hlavní charakteristika je omezený soubor instrukcí a Harvardská architektura. [9]
- **Mikrokontrolér** – na vývoji tohoto druhu součástek se podílelo především ekonomické hledisko. Jednočipové mikropočítače jsou univerzální a jako takové jsou dražší už třeba potřebou více vývodových pouzder. Pro dosažení příznivější ceny vznikly obvody u nich byla obětována univerzálnost. V řadě případů bylo použito řešení, kdy jednočipový mikropočítač je zapouzdřen do malého pouzdra, a tak je znemožněno další rozšiřování. Hranice mezi těmito dvěma pohledy na řešení je tedy velmi neostrá a jako dobré kritérium je možné použít právě možnost rozšíření. [9]



Obr.: 2.5.1.: Řez 8-bitovým mikrokontrolerem [9]

Mikroprocesor přečte instrukci z paměti, provede její dekódování a pak instrukci provede. [9]



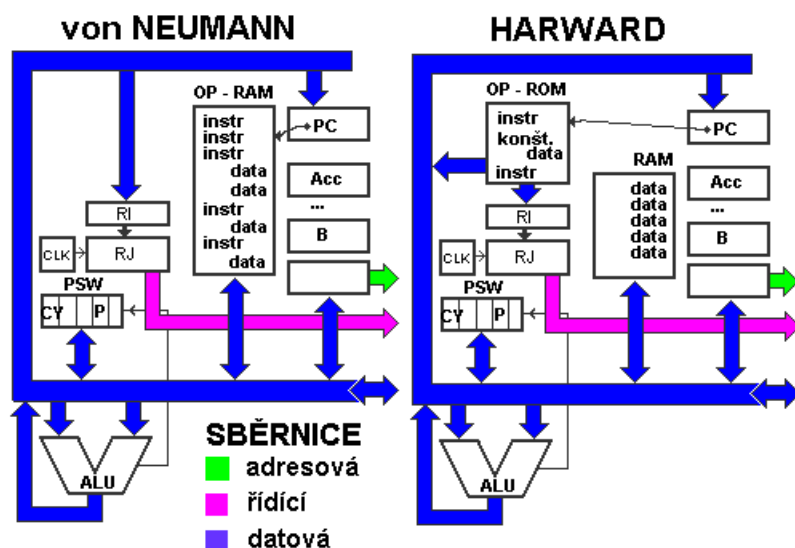
Obr.: 2.5.2.: Instrukční cyklus [9]

### Instrukční sady CISC a RISC

- Kompletní soubor instrukcí CISC (Complex Instruction Set Computer) Procesory CISC mohou jedním ze svých komplexních příkazů provádět více paměťových operací současně. To zjednodušuje práci kompilátoru a omezuje počet požadovaných registrů. Zato rostou nároky na řídicí jednotku, tedy onu část procesoru, která koordinuje provádění příkazů. Uvnitř procesoru CISC je touto jednotkou zpravidla vlastní procesor. Mikrokódování je typickou implementační technologií ze světa CISC. V ROM čipu jsou přitom uloženy různé mikroprogramy, jejichž úlohou je přeložit komplexní instrukce přímo na čipu do jednoduchých příkazů. [9]
- Omezený soubor instrukcí RISC (Reduced Instruction Set Computer) vychází z toho, že pro 80% programů stačí 20% instrukcí z úplného souboru. Sekundárně se tato charakteristika promítla také do názvosloví, a tak se hovoří o RISC procesorech. Výrobci vyhodnotili uvedenou statistiku a vybrali jen „nutné“ instrukce. To jim umožnilo zjednodušit jejich dekódování. Jednodušší dekodér je samozřejmě levnější a příznivě se projevuje také v rychlosti a tím ve výkonech. Je však třeba zmínit, že každý výrobce pokládá za nutné instrukce něco trochu jiného, a tak nejsou instrukční soubory všech výrobců identické. [9]

## Organizace paměti

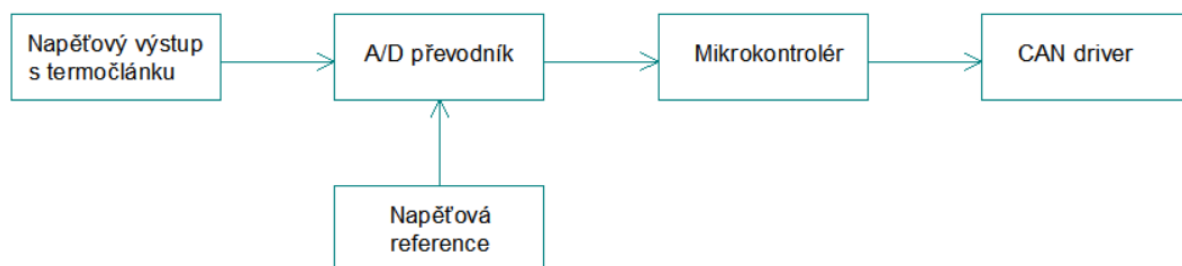
Rozdíl mezi Harwardskou a von Neumannovou koncepcí je v organizaci paměti. Harwardská má programovou a datovou paměť oddělenou, kdežto von Neumannova architektura má pro obě paměti společný adresný prostor. [9]



Obr.: 2.5.3.: Harwardská a von Neumannova koncepce organizace paměti [9]

### 3. Návrh koncepce sensoru pro vysokoteplotní měření

Sensor pro vysokoteplotní měření se skládá s napětového vstupu pro termočlánek, zpracování signálu pomocí A/D převodníku a MCU. Výstup z desky sensoru je přes 3 vodičový CAN. Celá deska je napájena se zdroje 12V přes regulátor napětí na 3,3V.



Obr.:3.1.: Koncepce sensoru vysokoteplotního sensoru

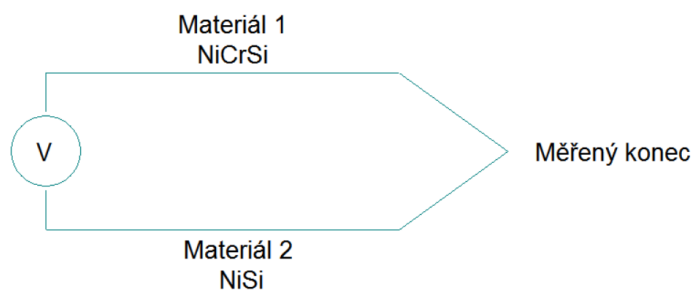
Napětový vstup z termočláneku se pohybuje řádově od záporných jednotek mV do kladných desítek mV. Teplota měřená termočlánekem typu N je od -260 °C do 1290 °C. Takto velký rozdíl teplot při napětové hladině desítek mV na plný rozsah vyžaduje velmi přesné měření a zpracování napětí, proto je zde použit přesný A/D převodník (24bit).

A/D převodník má využity oba dva kanály, a to pro měření NTC (chladný konec) a TC (teplý konec, termočlánek). Chladný konec je brán jako referenční teplota a zároveň napětí.

Mikrokontrolér zpracovává příchozí digitální informace o teplotách a dále je zpracovává a porovnává data s tabulkou závislosti napětí na teplotě a pomocí lineární aproximace provádí dopočet dané teploty s přesností na desetiny stupně. Teploty dále odesílá na CAN driver. Teploty je možné vyčíst a dále s nimi pracovat v PC.

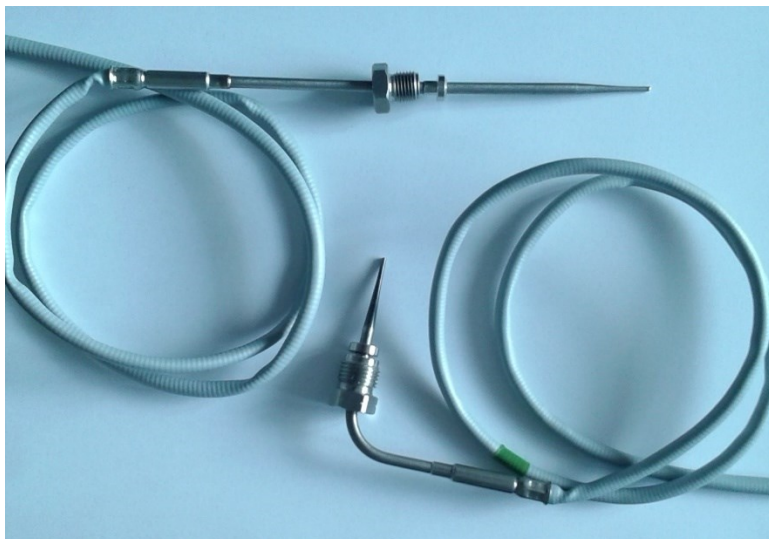
### 3.1. Použitý termočlánek

Pro vysokoteplotní měření je použit termočlánek typu N. Termočlánek se skládá se dvou kovů a to konkrétně NiCrSi a NiSi. Tento termočlánek má teplotní rozsah od  $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $1290\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Termoelektrické napětí termočláňku se pohybuje od cca  $-4,4$  do cca  $47,5\text{ mV}$ .



Obr.:3.1.1.: Zjednodušený termočláňkový obvod typu N

Takovéto provedení termočláňku se používá v automotive, konkrétně pro měření teploty spalín. Tomu také odpovídá typ zapouzdření se speciální slitiny, která je odolná, ale zároveň vysoce tepelně vodivá. Termočlánek byl zapůjčen firmou Continental pro měřicí účely k této diplomové práci.

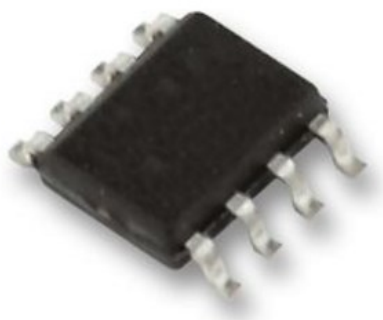


Obr.:3.1.2.: Použitý termočlánek typu N

### 3.2. Použitý převodník

A/D převodník MCP3911A0-E byl vybrán pro své vlastnosti, především 24bitové rozlišení, které umožňuje dostatečnou přesnost pro velký teplotní rozsah termočlánku. Použitý A/D převodník nepotřebuje zesilovač, protože je schopen zpracovávat již velmi nízká napětí, což přispívá miniaturizaci a zjednodušení navrhované desky.

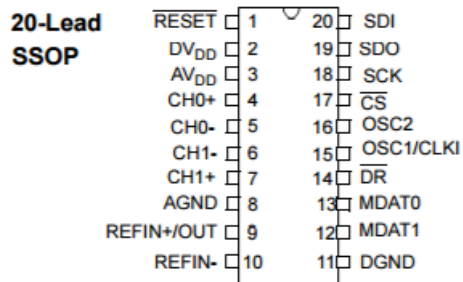
MCP3911A0-E / SS je 2 - kanálový Analog Front End (AFE), který obsahuje dva synchronní vzorkování delta-sigma analogově-digitální převodníky (ADC), dvě PGAS, fázové zpoždění kompenzačního bloku, modulátor výstupního bloku, digitální ofset a získat chyby již kalibrační registrů a vysokorychlostní 20MHz SPI kompatibilní sériové rozhraní. Tyto MCP3911 ADCs jsou plně konfigurovatelné s funkcemi, jako je 16/24-bitovým rozlišením, OSR od 32 do 4096, zisk je 1x až 32x, nezávislé vypnutí a obnovení, tónování a auto-nulování. MCP3911 je schopen koordinovat velké množství napětí a proudových senzorů včetně zkratů, transformátory proudu, Rogowského cívky a Hallových senzorů. [4]



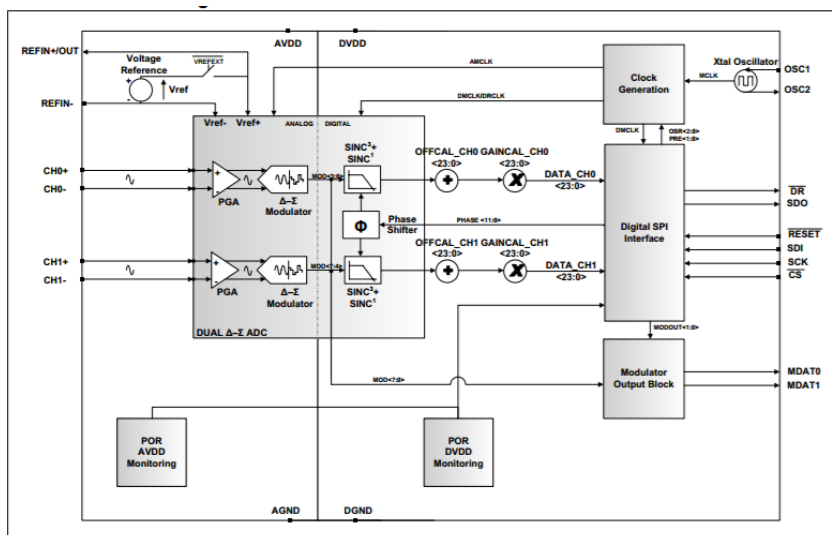
Obr.:3.2.1.: A/D převodník MCP3911A0-E [4]

- 94,5 dB SINAD, -106.5dBc Celkové harmonické zkreslení (THD) (do 35. harmonické)
- 111 dB Rušivé bez dynamický rozsah (SFDR) pro každý kanál
- Programovatelný rychlost přenosu dat až 125ksps
- Ultra režim vypnutí low-power s  $<2\mu\text{A}$
- 122 Db Přeslech mezi dvěma kanály
- 7ppm reference vnitřní napětí / ° C Nízká drift
- Referenční vstupních pinů diferenciální napětí
- Vysoký zisk PGA na každém kanálu (až 32V / V)
- kompenzace fázového zpoždění s rozlišením 1 $\mu\text{s}$  časovým
- Samostatné modulátor výstupy pro každý kanál
- Převzorkování poměr až 4096
- Individuální 24-bitový digitální ofset a získat opravu chyb pro každý kanál
- Vysokorychlostní 20MHz SPI Interface s režimem 0,0 a 1,1 kompatibility
- Kontinuální režim Read / Write pro minimální komunikace
- Nízká spotřeba energie (8.9mW na 3.3V, 5.6mW na 3.3V v režimu s nízkou spotřebou) [4]

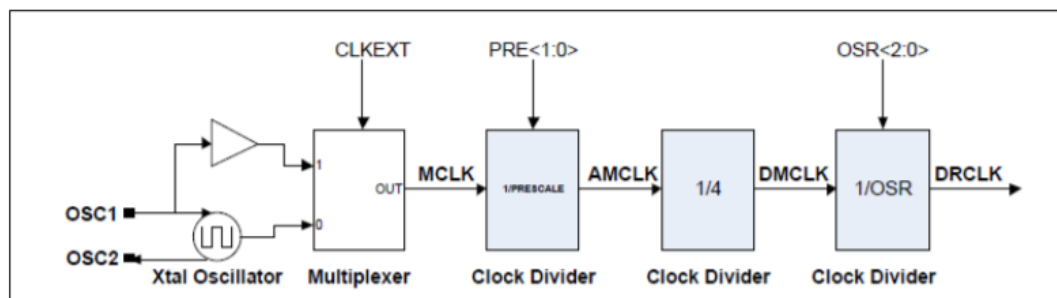




Obr.:3.2.2.: A/D převodník MCP3911A0-E [4]



Obr.:3.2.3.: Blokový diagram A/D převodníku MCP3911A0-E [4]



Obr.:3.2.4.: Clock diagram A/D převodníku MCP3911A0-E [4]

### 3.3.Použitý Mikrokontrolér (MCU)

Mikrokontrolér PIC32MX575F256H-80I / PT je použit pro volný SW od firmy microchip. I jiné společnosti umožňují volné stažení SW, proto se porovnaly různé MCU od různých výrobců. Kladl se důraz především na zabudovaný CAN protokol. Požadované parametry splňovalo několik mikrokontrolérů, proto byl vybrán tento s důvodů přijatelné ceny.

PIC32MX575F256H-80I / PT je 32-bitový 256kB 80MHz 64-pin mikrokontrolér s grafickým rozhraním, USB, CAN a Ethernet. CPU zpracuje instrukce, dekoduje každou instrukci, načte zdrojové operandy provádí každou instrukci a zapíše výsledky provádění instrukcí k jednotlivým destinacím. Procesor Jádru MIPS32 M4K obsahuje několik logických bloků pracujících společně paralelně, poskytují efektivní vysoce výkonné výpočetní jádro. Procesor MIPS® M4K® nabízí mnoho funkcí pro správu napájení, včetně nízké spotřeby designu, aktivního řízení napájení a power-down režimy provozu. Jádro má statickou konstrukci, která podporuje zpomalení nebo zastavení hodin, což snižuje spotřebu energie systému v době nečinnosti. [3]



Obr.:3.3.1.: Mikrokontrolér PIC32MX575F256H-80I [3]

- MCU - USB 2.0 periferní s integrovaným PHY
- MCU systém - 4-kanálový řadič hardware a DMA řadič přerušování vektorově programovatelný
- Analogový - Rychlý a přesný 16-kanálový 10-bit ADC
- Režimy řízení spotřeby – režim nečinnosti a spánku
- Debug - 8 hardwarových zářezů (6 instrukční a datové 2), 2-wire programování, odladování interface
- Fail-Safe hodiny Monitor - umožňuje bezpečné vypnutí, pokud selže hodiny
- Hardware RTCC (real-time hodiny, kalendář s alarmy)
- 2 interní oscilátory (8 MHz a 31kHz)
- Časovač s odděleným RC oscilátorem
- Pinově kompatibilní s 16-bitovým PIC® MCU
- Sériové komunikační moduly umožňují flexibilní UART / SPI konfiguraci / I<sup>2</sup>C™
- ESD citlivé zařízení, věnovat náležitou opatrnost při manipulaci zařízením. [3]



### 3.4. Použitý CAN driver

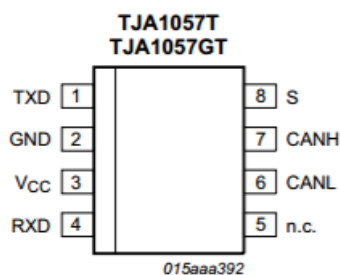
Tento CAN driver byl použit pro jeho jednoduchost a nízkou pořizovací cenu. Takovýchto komponent je na trhu mnoho a pro tuto aplikaci stačil pouze jednoduchý driver, proto byl vybrán tento.

TJA1057 je součástí rodiny Mantis vysokorychlostních CAN vysílačů. To poskytuje Rozhraní mezi Controller Area Network (CAN) regulátorem protokolu a fyzický dvou vodičové sběrnice CAN. Vysílač je určen pro vysokorychlostní aplikace můžete v automobilový průmysl, poskytuje diferenciální vysílací a přijímací schopnost (a mikrořadič s) řadič CAN protokolu. [4]

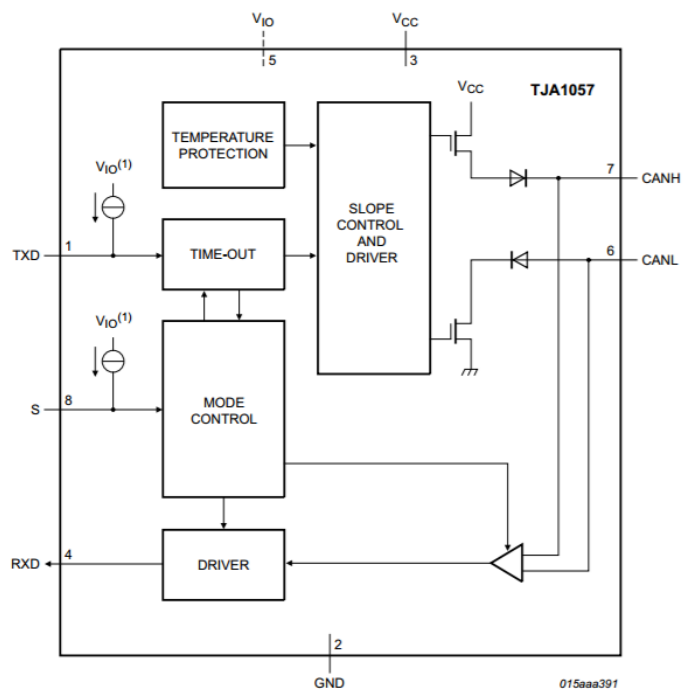


Obr.:3.4.1.: CAN driver TJA1057 [5]

- Plně kompatibilní ISO 11898-2: 2003 kompatibilní
- optimalizován pro použití v 12 V automobilových systémů
- hardware výkonnostní požadavky na EMC splňuje "Pro LIN, CAN a FlexRay Rozhraní v automobilovém průmyslu "
- VIO volba umožňuje přímé propojení s 3,3 V a 5 V dodané mikroprocesory
- Non-VIO varianty mohou komunikovat s 3,3 V a 5 V dodaných mikroprocesory
- mikrořadič vstupy / výstupy jsou 5 V [4]



Obr.:3.4.1.2.: CAN driver TJA1057 [4]



Obr.:3.4.1.3.: Blok diagram CAN driver TJA1057 [4]

## 4. Návrh a realizace HW části

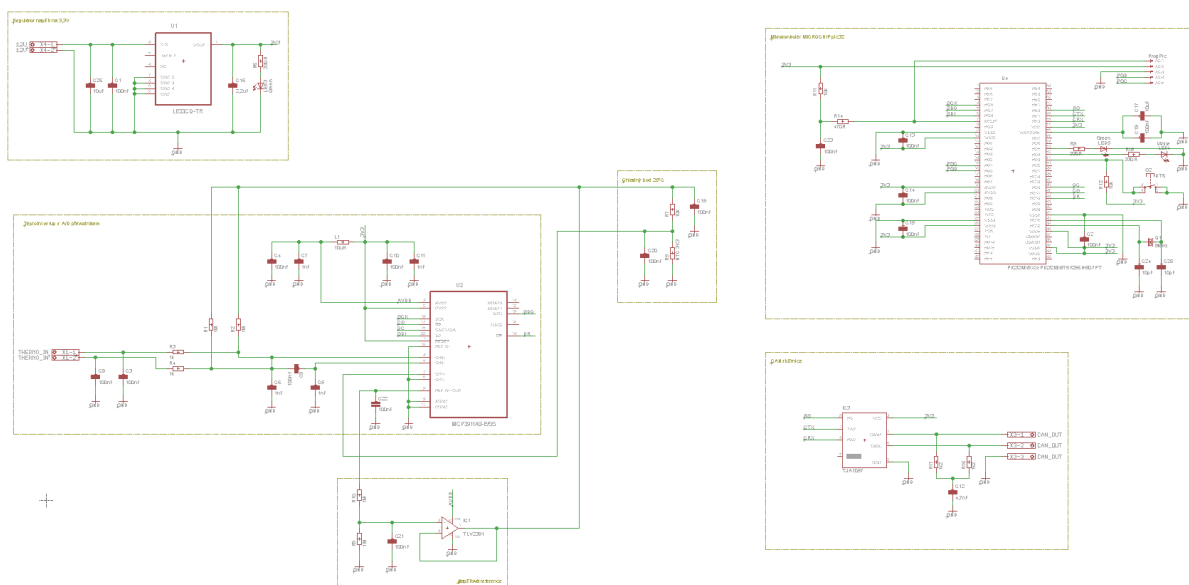
Pro návrh hardware byl použit program EAGLE 6.3.0. V tomto programu je navrženo obvodové schéma a návrh desky.

Deska je vytvořena oboustranné pro větší minimalizaci sensoru.

### 4.1. Návrh schématu

Návrh je rozdělen do několika dílčích částí. Všechny části jsou napájeny napětím 3,3V s regulátoru napětí. Je zde regulátor napětí s 12V napájení na napájení 3,3V se signalizací připojeného napájení. Dále je zde napěťový vstup z termočlánku s měřením reference teplotního napětí. Tato část plošného spoje zahrnuje A/D převodník se dvěma kanály jedním pro měření chladného referenčního konce a druhý pro měření teploty termočlánku.

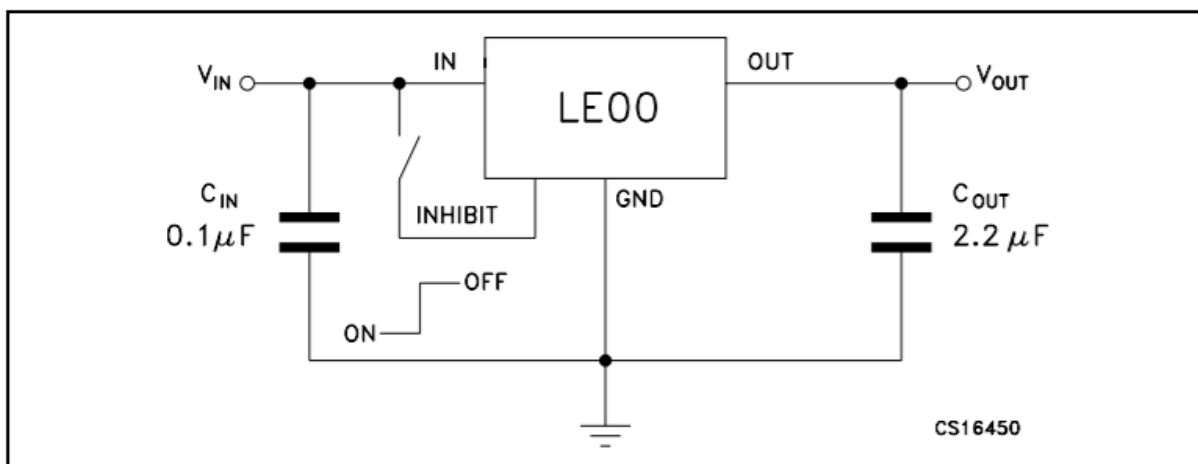
Data s A/D převodníku se posílají do mikrokontroléru, kde se data zpracovávají a naměřené napětí se převádí na měřenou teplotu. Tato data se dále posílají na CAN driver, odkud je možné data vyčíst pomocí CAN logeru.



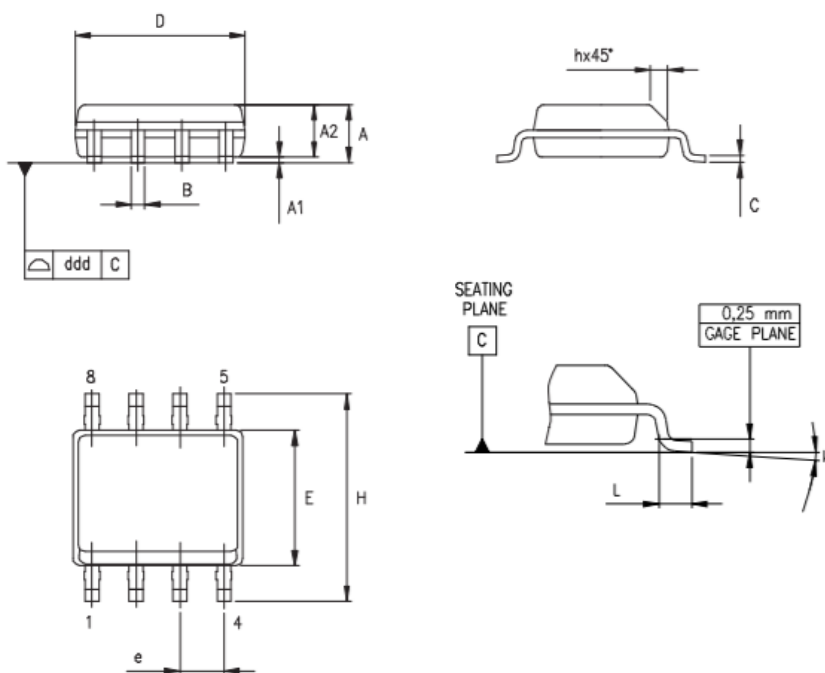
Obr.:4.1.1.: Obvod pro měření teploty s termočlánkem

#### 4.1.1. Regulátor napětí

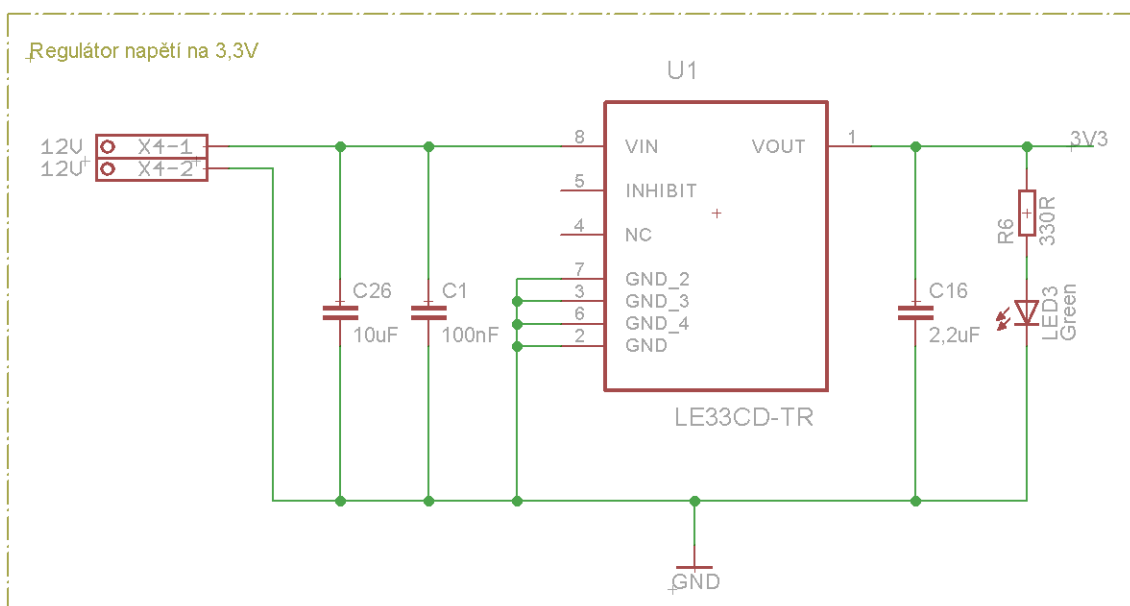
Regulátor napětí s 12V na 3,3V. Je zde použit regulátor LE33CD-TR, na svorky je připevněn vstup 12V a na výstupu je kontrolní LED dioda. Zapojení ve schématu je inspirováno vzorovým zapojením s ohledem na úpravy pro zlepšení k dané aplikaci.



Obr.:4.1.1.1.: Vzorové zapojení [4]



Obr.:4.1.1.2.: Připojovací rozměry [4]



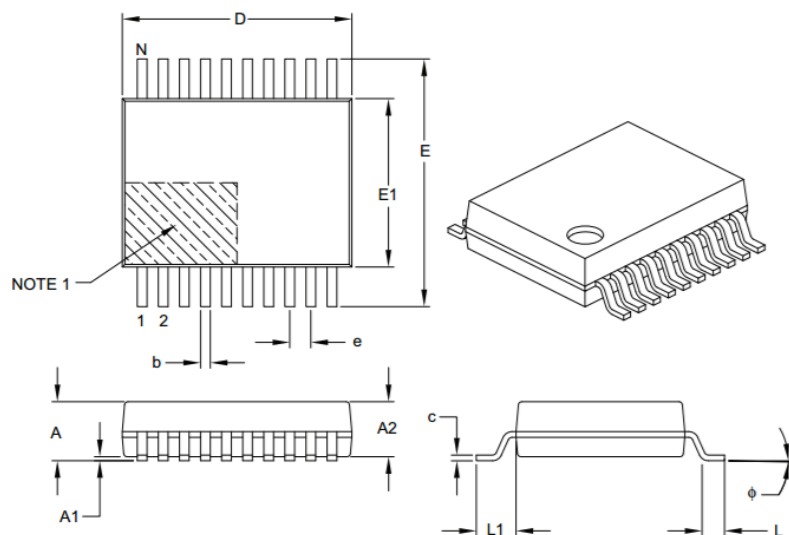
Obr.:4.1.1.3.: Regulátor napětí



#### 4.1.2. Napětový vstup z termočláнку

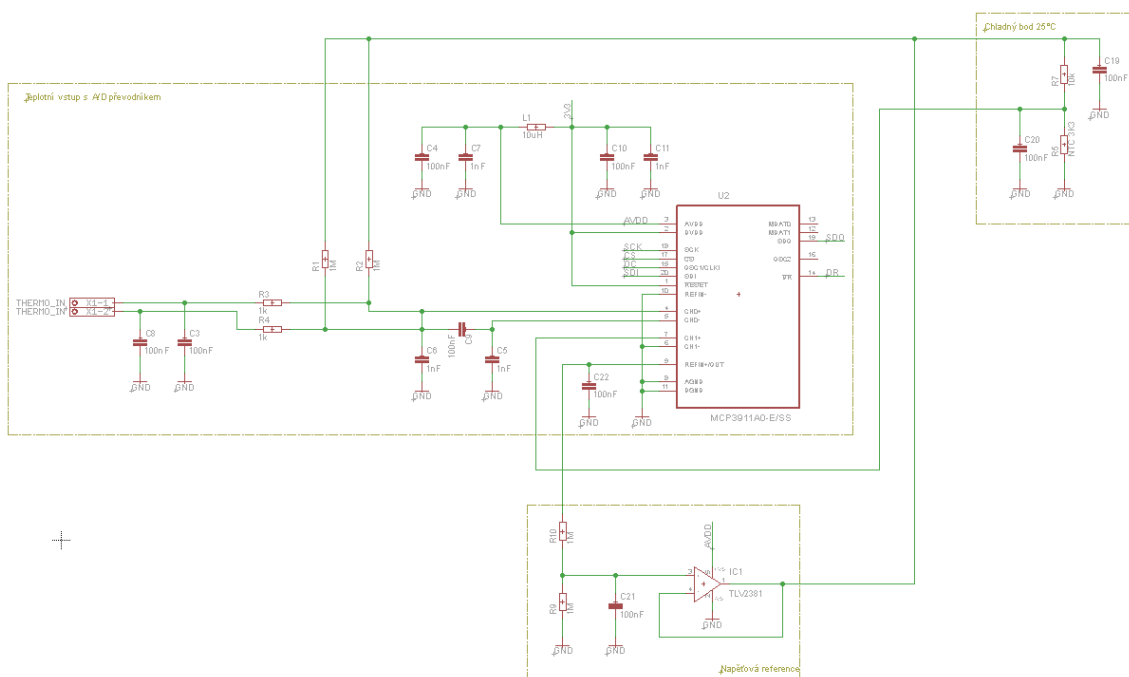
Část teplotního vstupu se skládá z prvního zpracování informace o teplotě. K tomu je zapotřebí také měřit teplotu chladného bodu a porovnávání napětovou referencí.

Napětí z termočláнку je připojeno na A/D převodník MCP3911. Tento A/D převodník má dva vstupy, na druhý vstup je připojena napětová reference chladného bodu. K měření chladného bodu slouží NTC, které má referenční teplotu stanovenou na 25°C.



Units		MILLIMETERS		
Dimension Limits		MIN	NOM	MAX
Number of Pins	N	20		
Pitch	e	0.65 BSC		
Overall Height	A	–	–	2.00
Molded Package Thickness	A2	1.65	1.75	1.85
Standoff	A1	0.05	–	–
Overall Width	E	7.40	7.80	8.20
Molded Package Width	E1	5.00	5.30	5.60
Overall Length	D	6.90	7.20	7.50
Foot Length	L	0.55	0.75	0.95
Footprint	L1	1.25 REF		
Lead Thickness	c	0.09	–	0.25
Foot Angle	φ	0°	4°	8°
Lead Width	b	0.22	–	0.38

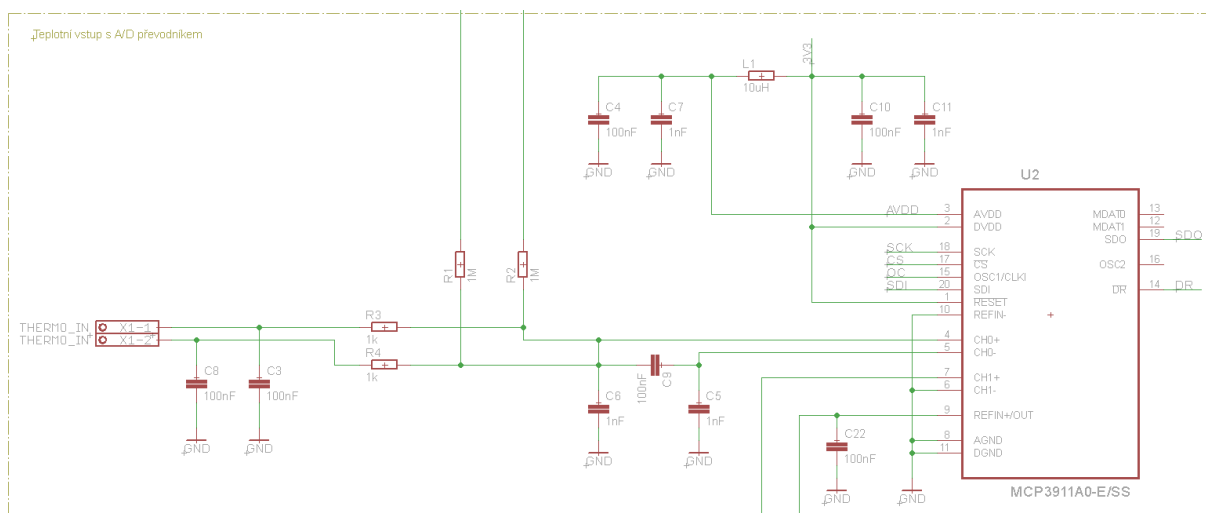
Obr.:4.1.2.1.: Připojovací rozměry A/D převodníku [4]



Obr.:4.1.2.2.: Teplotní vstup

### Napěťový vstup s A/D převodníkem

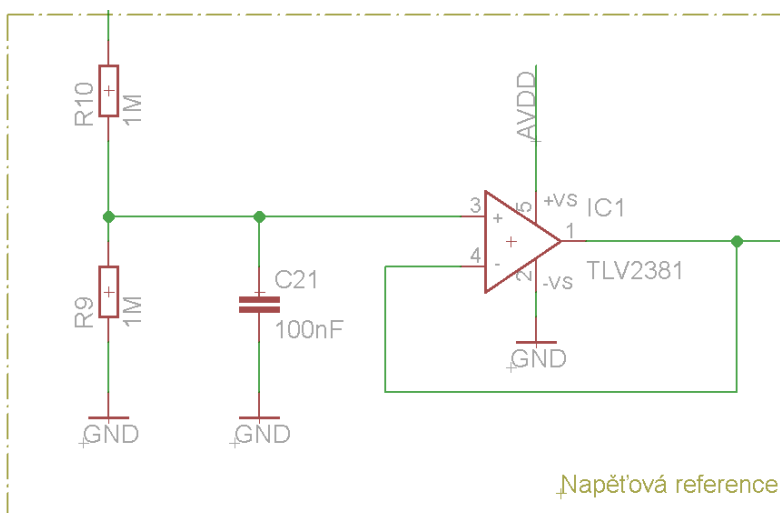
Na svorku teplotního vstupu se připojují kontakty termočlánku. Napětí na svorkách je připojeno k nultému kanálu A/D převodníku. Je zvolen 24 bitový A/D převodník MCP3911A0-E/SS. A/D převodník je napájen z regulátoru napětí. A/D převodník komunikuje s mikrokontrolérem pomocí vstupů a výstupů. Výstupy A/D jsou SCK, SDO, SDI, DR, CS a vstup do A/D je OC. K A/D převodníku je připojena napěťová reference a také chladný bod ke kanálu 1.



Obr.:4.1.2.3.: Teplotní vstup s A/D převodníkem

### Napětová reference

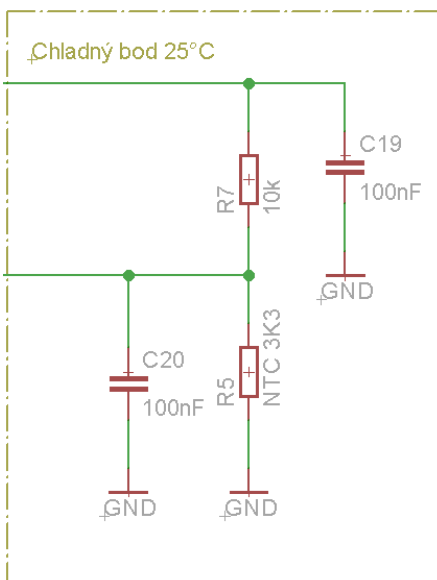
Operační zesilovač pro napětovou referenci je vybrán TLV3281. Na operační zesilovač je přivedeno napětí chladného bodu. Napětová reference je přivedena na A/D převodník teplotního vstupu.



Obr.:4.1.2.4.: Napětová reference

### Chladný bod

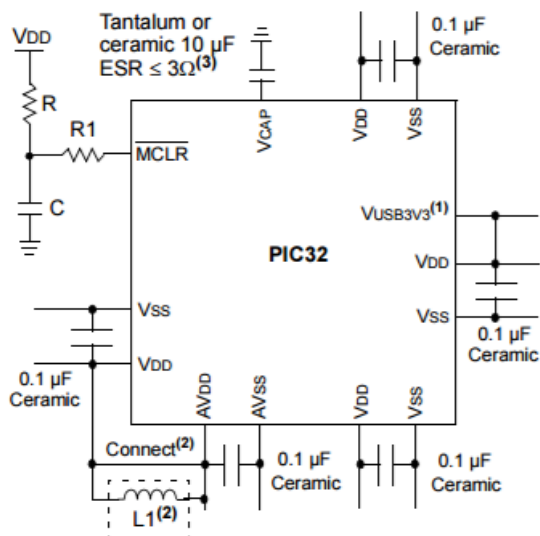
Chladný bod snímá teplotu okolí sensoru. Pro měření teploty je použitý NTC termistor 3K3 s odporem  $10k\Omega$  pro teplotu  $25^{\circ}\text{C}$ .



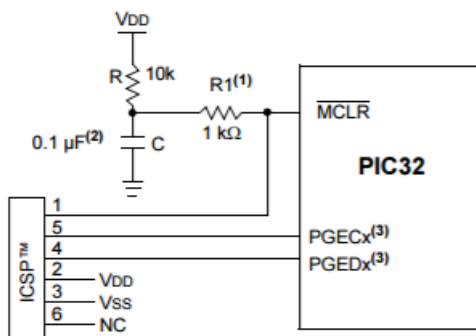
Obr.:4.1.2.5.: Chladný bod

### 4.1.3. Mikrokontrolér MICROCHIP pic32

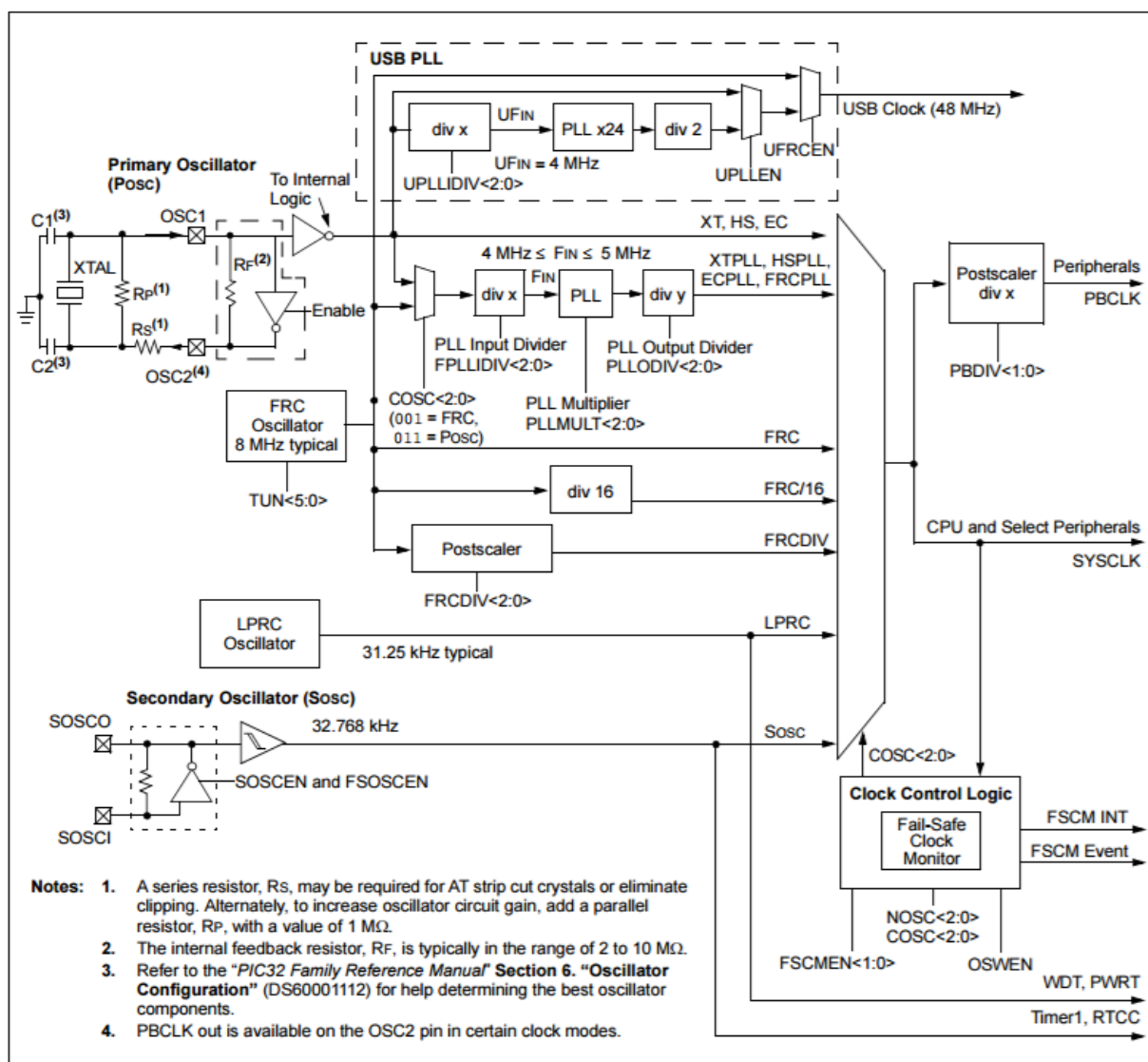
Pro sensor je vybrán mikrokontrolér MICROCHIP PIC32MX575F256H-80I/PT. Jedná se o 32Bitový MCU s CAN rozhraním. Mikrokontrolér má vstupy pro programování připravené pomocí oboustranného kolíku. MCU komunikuje s A/D převodníkem a také přes CAN rozhraní s CAN sběrnici. Na jeden vstupy a dva výstupy jsou připevněny také dvě led diody a přepínač pro simulaci stavů pro latění a testování programu MCU. Tyto komponenty nemají funkci u vysokoteplotního sensoru, ale mají význam a funkci u demonstrační soustavy.



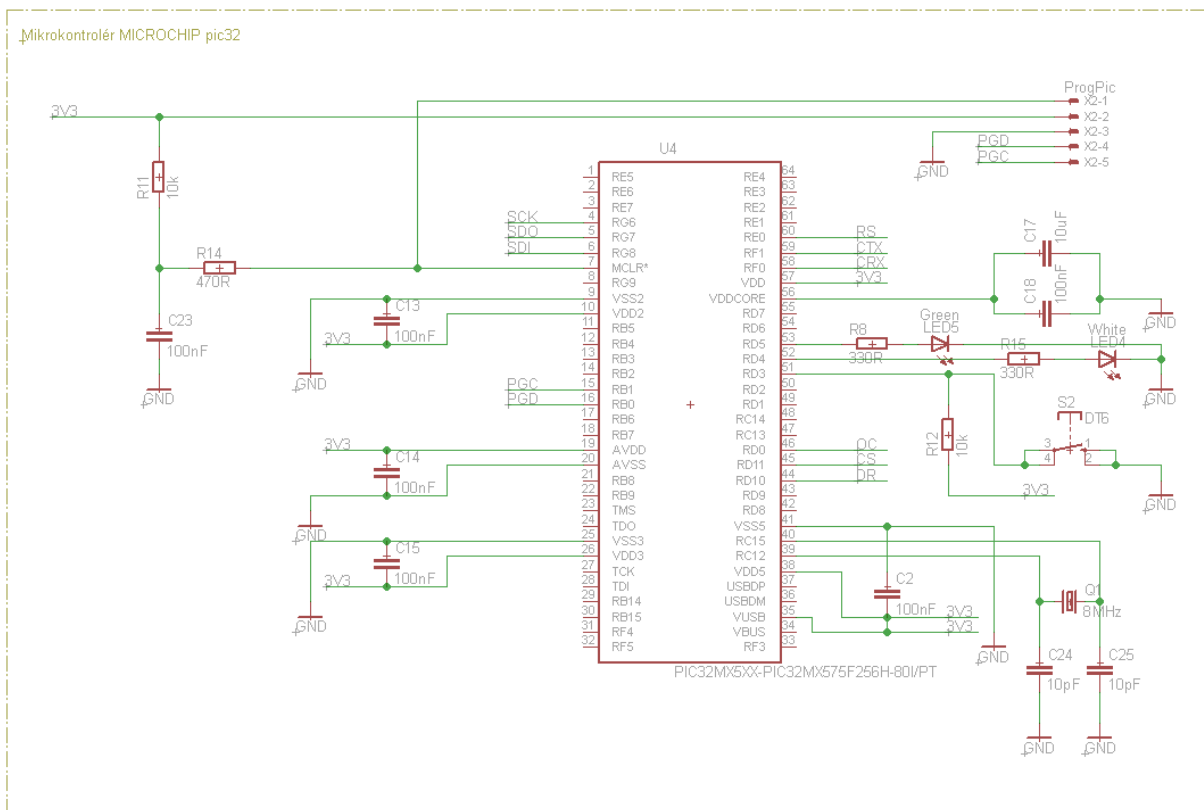
Obr.:4.1.3.1: Napájení mikrokontroléru MICROCHIP pic32 [3]



Obr.:4.1.3.2: Připojení programátoru k mikrokontroléru MICROCHIP pic32 [3]



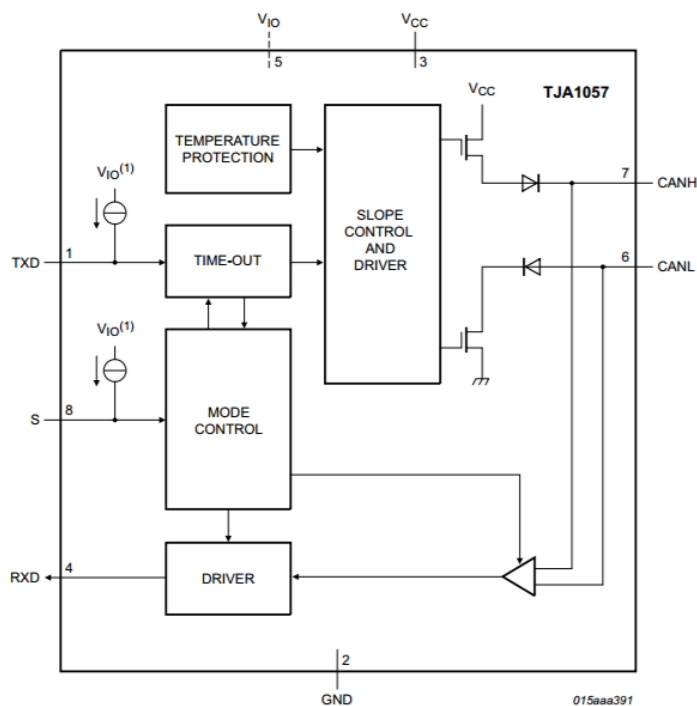
Obr.:4.1.3.3: Vnitřní schéma Mikrokontroléru MICROCHIP pic32 [3]



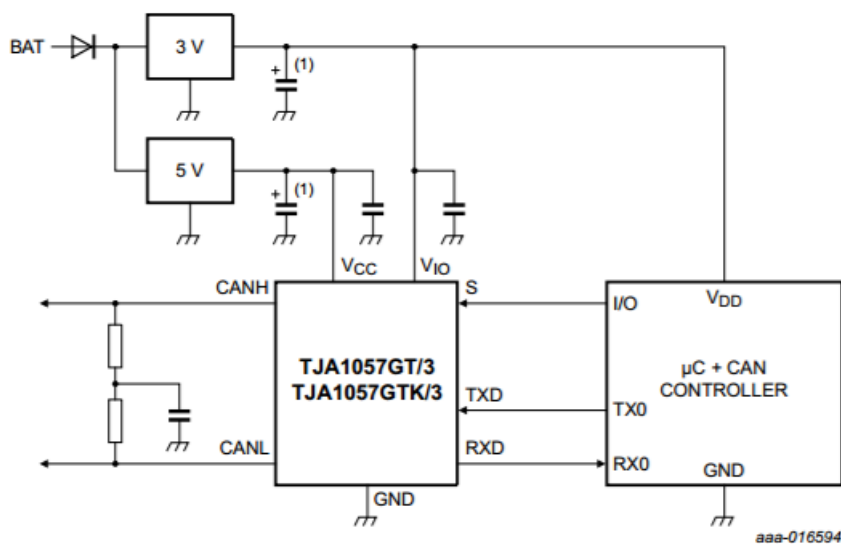
Obr.:4.1.3.4: Mikrokontrolér MICROCHIP pic32

#### 4.1.4. CAN sběrnice

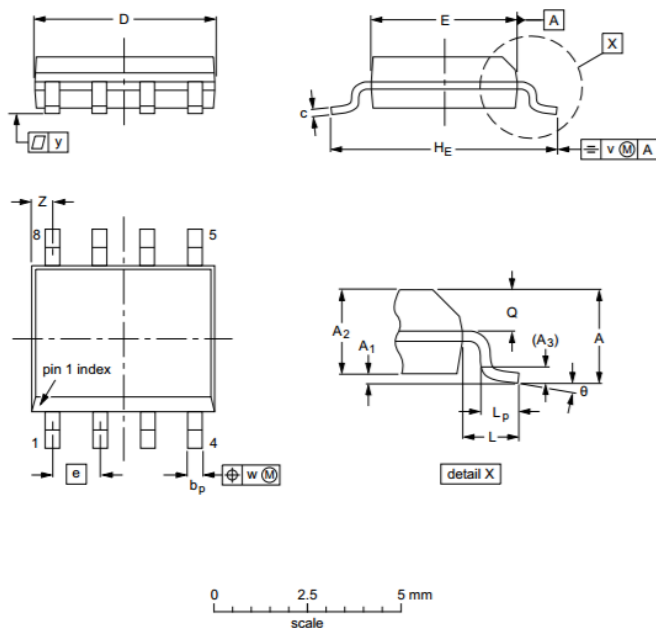
CAN sběrnice je použita TJA1057, kterému zasílá CAN protokol mikrokontrolér. Výstup se sběrnice je na třívodičový CAN port. Tato sběrnice byla vybrána pro svou jednoduchost a nízkou pořizovací cenu. Svými parametry plně vyhovuje použití v této aplikaci.



*Obr.:4.1.4.1: Vnitřní schéma CAN sběrnice [4]*



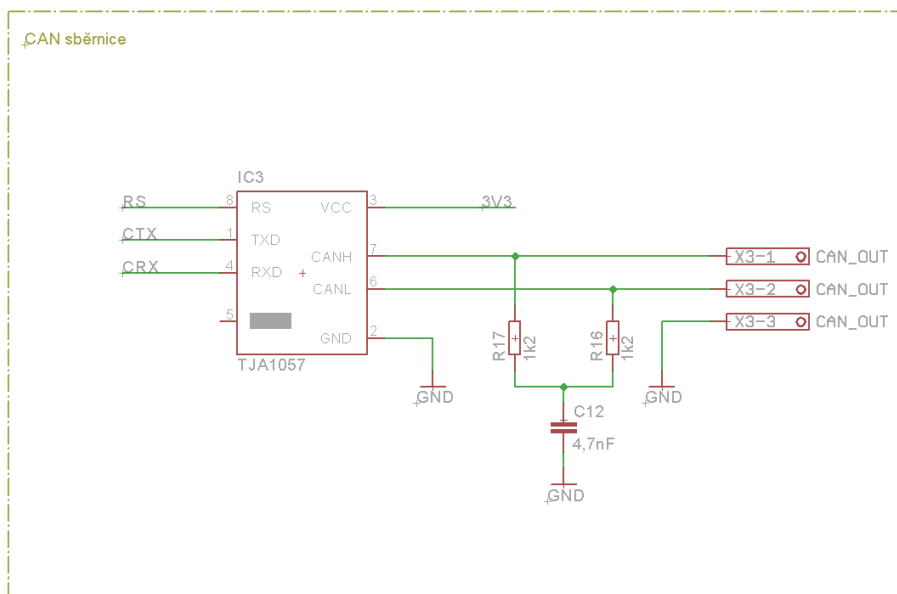
*Obr.:4.1.4.2: Vnitřní schéma CAN sběrnice [4]*



DIMENSIONS (inch dimensions are derived from the original mm dimensions)

UNIT	A <sub>max.</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	b <sub>p</sub>	c	D <sup>(1)</sup>	E <sup>(2)</sup>	e	H <sub>E</sub>	L	L <sub>p</sub>	Q	v	w	y	Z <sup>(1)</sup>	θ
mm	1.75	0.25 0.10	1.45 1.25	0.25	0.49 0.36	0.25 0.19	5.0 4.8	4.0 3.8	1.27	6.2 5.8	1.05	1.0 0.4	0.7 0.6	0.25	0.25	0.1	0.7 0.3	8° 0°
inches	0.069	0.010 0.004	0.057 0.049	0.01	0.019 0.014	0.0100 0.0075	0.20 0.19	0.16 0.15	0.05	0.244 0.228	0.041	0.039 0.016	0.028 0.024	0.01	0.01	0.004	0.028 0.012	

Obr.:4.1.4.3: Připojovací rozměry CAN sběrnice [4]



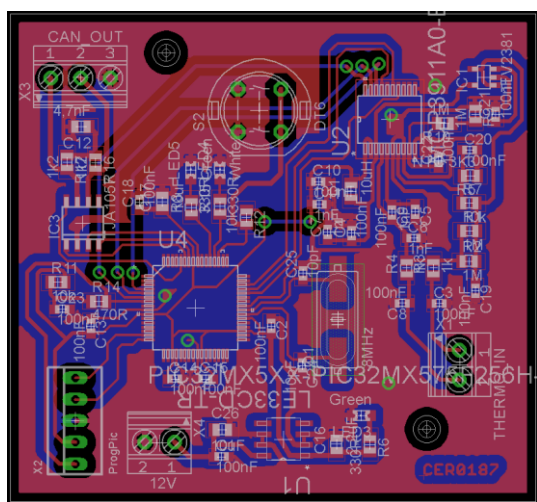
Obr.:4.1.4.4: CAN sběrnice



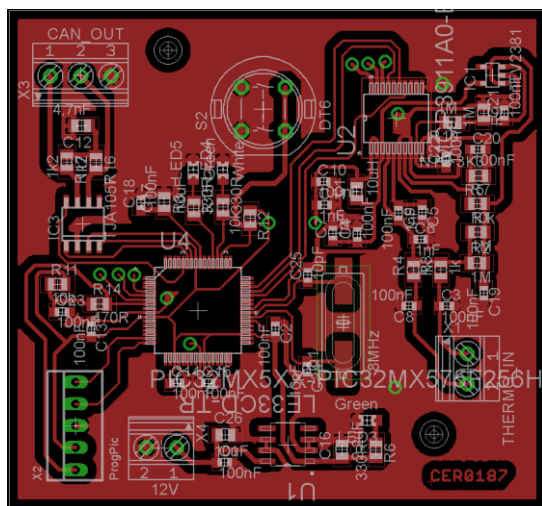
## 4.2. Rozmístění komponent

Komponenty na desce jsou rozmístěny s ohledem na principiální funkčnost jednotlivých prvků a vazeb mezi nimi. Velikost desky byla minimalizovaná s ohledem na vyrobiteľnosť desky. Prívody a odvody desky jsou umístěny na okrajích desky pro lepší přístup.

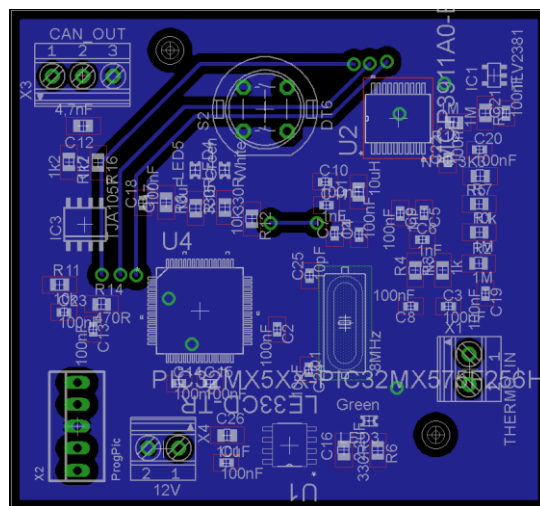
Deska je vyrobená oboustranně, přičemž komponenty jsou na přední straně a zadní stěna je využita pouze pro spoje. Na obou stranách je vylitý polygon zemně, pro lepší odolnost vůči rušení. Tyto zemnění jsou propojeny několika prokovy pro co nejlepší odrušení. Na desce jsou také umístěny montážní díry, pro možnost přichycení.



Obr.:4.2.1.: Návrh rozmístění komponent



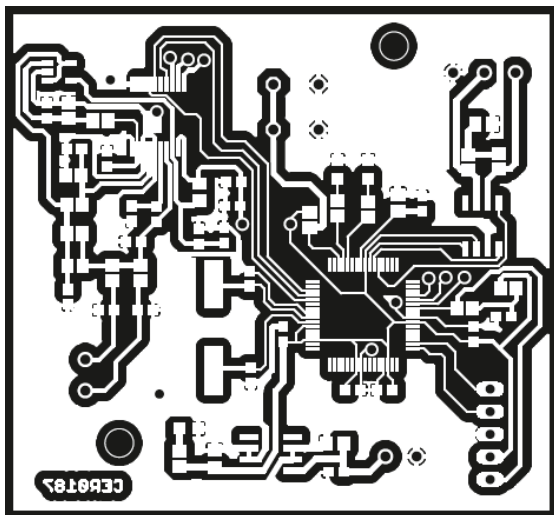
Obr.:4.2.2.: Rozmístění komponent přední strana



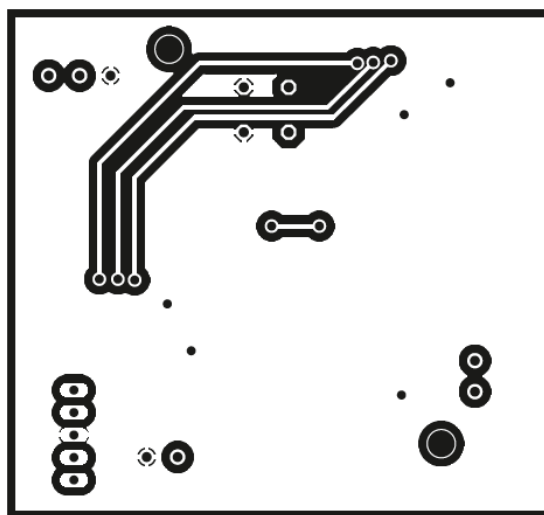
Obr.:4.2.3.: Rozmístění komponent zadní strana

### 4.3.Tvorba plošného spoje

Leptání plošného spoje je provedeno na oboustrannou cuprextitovou desku s fotocitlivou vrstvou. Pájení je provedeno pomocí mikro pájky. Tato deska je tvořena pozitivní maskou z důvodu použité technologie.



Obr.:4.3.1.: Maska DPS přední strana



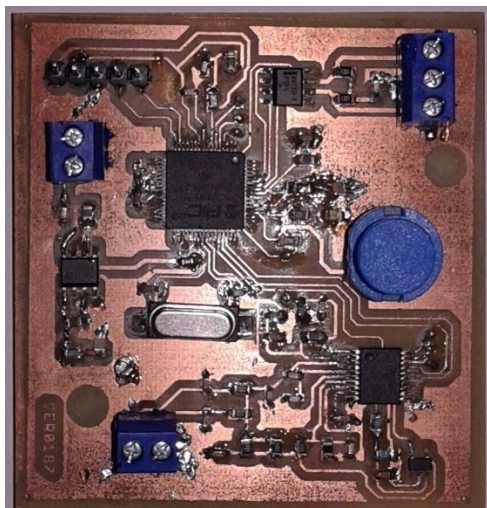
Obr.:4.3.2.: Maska DPS zadní strana

#### Postup leptání

- **Příprava předlohy:** pozitivní předlohu návrhu DPS vytištěnou na fólii. Přitom je důležité, aby byly vytištěné dráhy co nejméně průsvitné, a naopak zbytek předlohy co nejprůsvitnější. Předlohu je dobré vytisknout tak, aby potištěná strana přiléhala přímo na fotocitlivou vrstvu. [15]
- **Expozice:** Z desky se odstraní ochrannou samolepku. Předlohu položíme přímo na fotocitlivou vrstvu DPS. Pro lepší přilnutí předlohy k DPS je možné celou sestavu zatížit čistou skleněnou deskou (vyhnete se nadzvednutí předlohy vlivem teploty při osvětlování). Výslednou sestavu osvětlujeme ultrafialovým světlem, správná doba osvětlování je závislá na kvalitě předlohy a výkonu osvětlovacího zařízení. [15]
- **Vyvolání DPS:** plošný spoj vyvoláme v 1,5% roztoku hydroxidu sodného při pokojové teplotě. Hydroxid sodný je možné zakoupit již připravený, nebo jej připravit rozmícháním granulátu ve vodě podle návodu na obalu granulátu. Při vyvolávání je nutné zalít celou plochu DPS v misce roztokem hydroxidu sodného, dokud není patrné odstranění fotoemulze z osvětlených míst a vidíte pouze měděnou vrstvu. V případě potřeby můžete pomoci vyvolání DPS vatovým tampónem. Po vyvolání desku důkladně opláchněte pod tekoucí vodou a opatrně osušte. [15]

- **Leptání DPS:** DPS vložíme do misky s roztokem chloridu železitého, nebo ve směsi kyseliny chlorovodíkové, H<sub>2</sub>O a peroxidu vodíku. Roztok chloridu železitého je možné zakoupit již připravený pro tyto účely. Velmi dobrá metoda leptání je nechat DPS „plavat“ na hladině leptacího roztoku měděnou vrstvou dolů. Odleptaná měď tak může klesnout na dno nádoby a nebrání tak leptání jako v případě, že deska leží na dně nádoby. Zrychlit proces leptání je možné také zahřáním leptacího roztoku ve vodní lázni. Délka leptání je závislá na stáří roztoku, proto je vhodné desku často kontrolovat a nenechávat ji v roztoku déle, než je nutné. V tomto případě může dojít k takzvanému podleptání nebo narušení fotoemulze. Pokud se na některých místech odleptává měděná vrstva pomaleji, je možné leptání pomoci vatovým tampónem. Po vyleptání plošný spoj důkladně omyjte pod tekoucí vodou a opatrně osušit. [15]

- **Konečná ochrana DPS:** pro odstranění fotoemulze se použil. Pokud nebudete s plošným spojem okamžitě dále pracovat, je vhodné ošetřit plošný spoj lakem proti oxidaci mědi nebo počkat s omytím fotoemulze, která oxidaci brání.



Obr.:4.3.3.: Osazená DPS

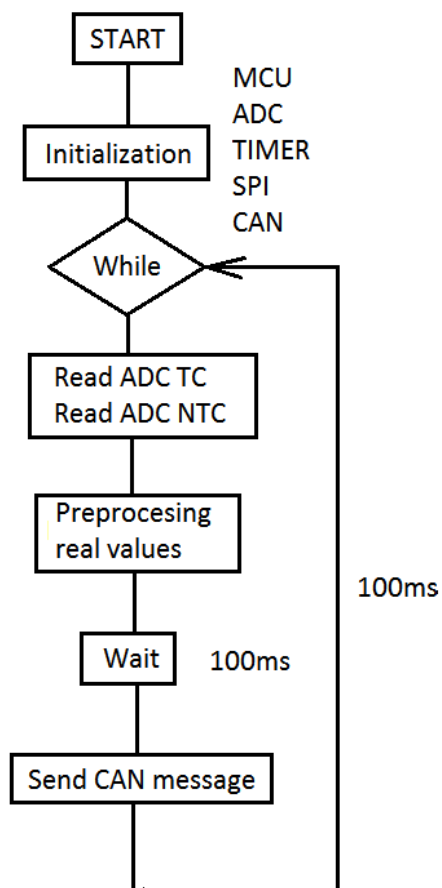
## 5. Návrh a realizace SW části

Softwarová část je tvořena pro výše uvedenou měřicí desku. Celý software je tvořen pro mikrokontrolér PIC 32 v programovacím prostředí MPLAB. Tato část diplomové práce se dá rozdělit na tři hlavní části, a to ADC převodník, kde probíhá SPI komunikace s ADC, vyčítání teplot s NTC jakožto chladného konce teplotního sensoru a vstup termočlánku, vysokoteplotní měření. Další část je přepočítání těchto měřených napětí s ADC převodníku na přesnou teplotu za použití vyčítání s lookup tabulek. Poslední hlavní částí je zasílání vypočtených teplot přes CAN do PC.

### 5.1. Koncepte řešení

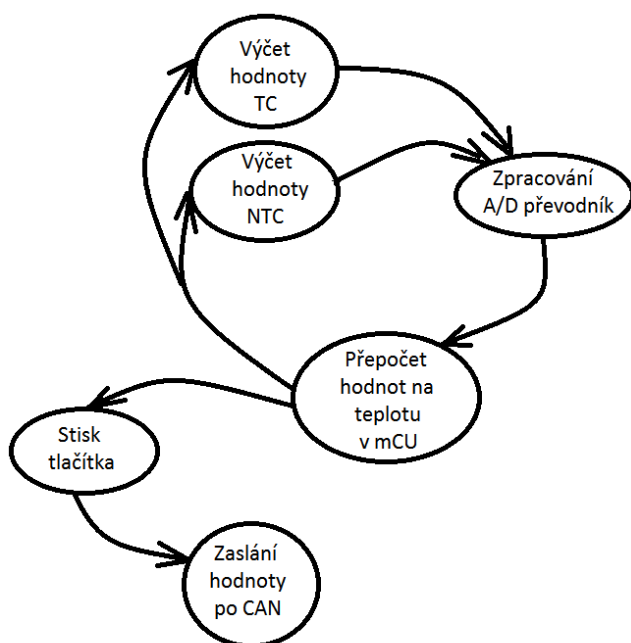
Tato koncepte řešení nastiňuje rámcové řešení programu. Níže uvedený diagram neřeší detailní části, jako jsou indikátory, vstupy a jednotlivé použité piny.

Hlavní koncepte řešení vychází koncepte návrhu měřicí desky. Při startu programu proběhne inicializace všech potřebných částí programu např. MCU, ADC, TIMER, SPI a CAN. Po inicializaci program vstoupí do smyčky, ve které probíhá vyčítání naměřených hodnot s NTC a TC, které se níže přepočítají na měřené teploty. Tyto přepočtené teploty se posílají přes CAN komunikaci.



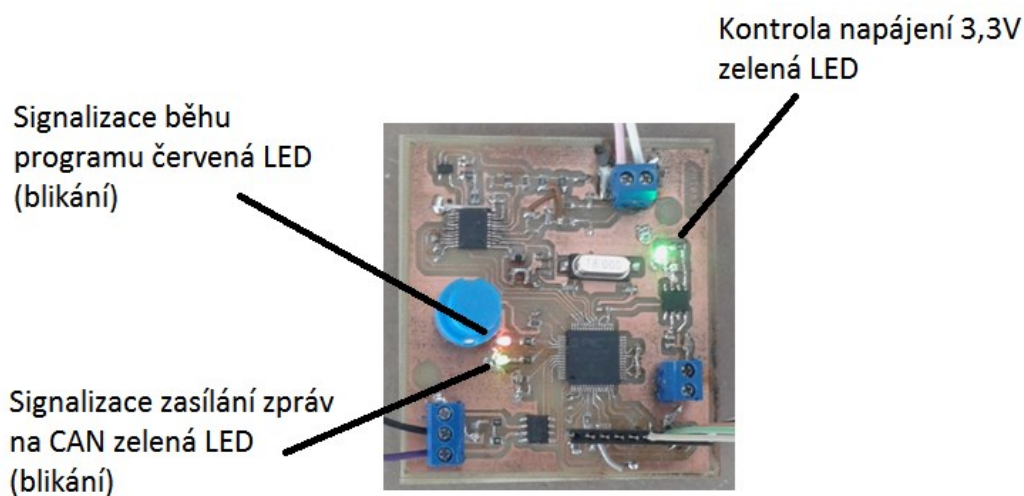
Obr.:5.1.1.: Blokový digram SW řešení

Testovací algoritmus pro zasílání zpráv po CAN je vyvoláván stiskem tlačítka z důvodů lepší odladitelnosti programu. Celý program zůstává jinak stejný jako u periodického zasílání zpráv.



Obr.:5.1.2.: Stavový digram testovací funkce senzoru

Sensor snímá teplotu pomocí dvou teplotních čidel TC a NTC, které jsou připojeny do A/D převodníku a tyto data jsou zasílána ke zpracování do mikrokontroléru. Pro indikaci správného napájení slouží osamocená zelená LED dioda patrná na obrázku. Pro kontrolu běhu programu je použita červená LED dioda, která bliká při běhu programu. Zpracované hodnoty jsou posílány přes CAN do PC na základě vyžádání uživatelem. Toto vyžádání probíhá modrým tlačítkem, po dobu stisku jsou data zasílána a zasílání je rovněž indikováno zelenou LED diodou vedle červené diody.

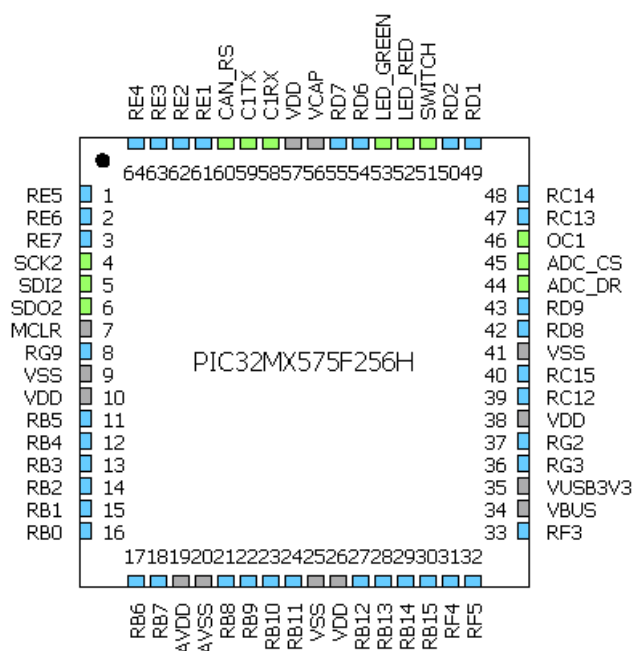


Obr.:5.1.3.: Funkcionalita senzoru

## 5.2.Hlavní části programu

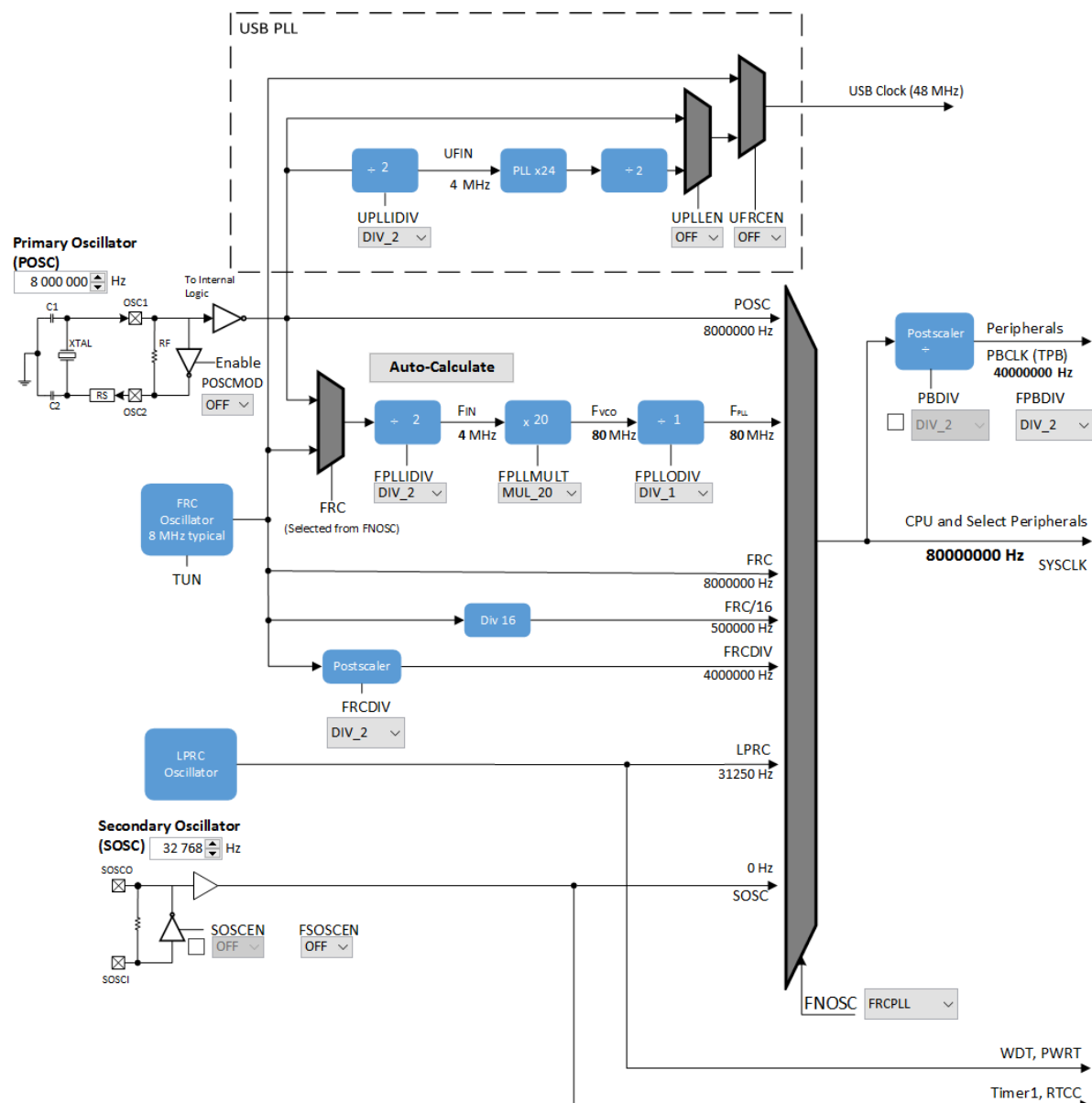
Níže na obrázku je patrné rozložení vstupů a výstupů používaných v programu. Tyto vstupy a výstupy jsou použity k přijímání naměřených hodnot, a parametrizaci ADC převodníku pin 4 SCK, pin 45 CS, pin 46 OC, pin 6 SDI, pin 5 SDO a pin 44 DR. Indikaci stavů v průběhu měření, a to červená LED dioda k indikaci běhu programu na output pin 52 a indikace vysílání CAN zpráv zelená LED dioda na output pin 53. Tlačítkem na input pin 51 se ovládá spouštění zaslání CAN zpráv. K zaslání zpráv a ovládání CAN driveru jsou použity vstupy pin 60 RS, pin 59 CTX a pin 58 CRX.

Používané piny jsou zobrazeny níže na pin diagramu a vyznačeny zelenou barvou. Nastavení vstupů a výstupů bylo provedeno v podprogramu HARMONY Configurator programu MPLAB, kde je možné definovat vlastnosti jednotlivých pinů a také vlastnosti celého mikrokontroléru. Programu HARMONY Configurator bylo také použito k nastavení komunikační rychlosti CAN zpráv.



Obr.:5.2.1.: Pin diagram s použitými pin

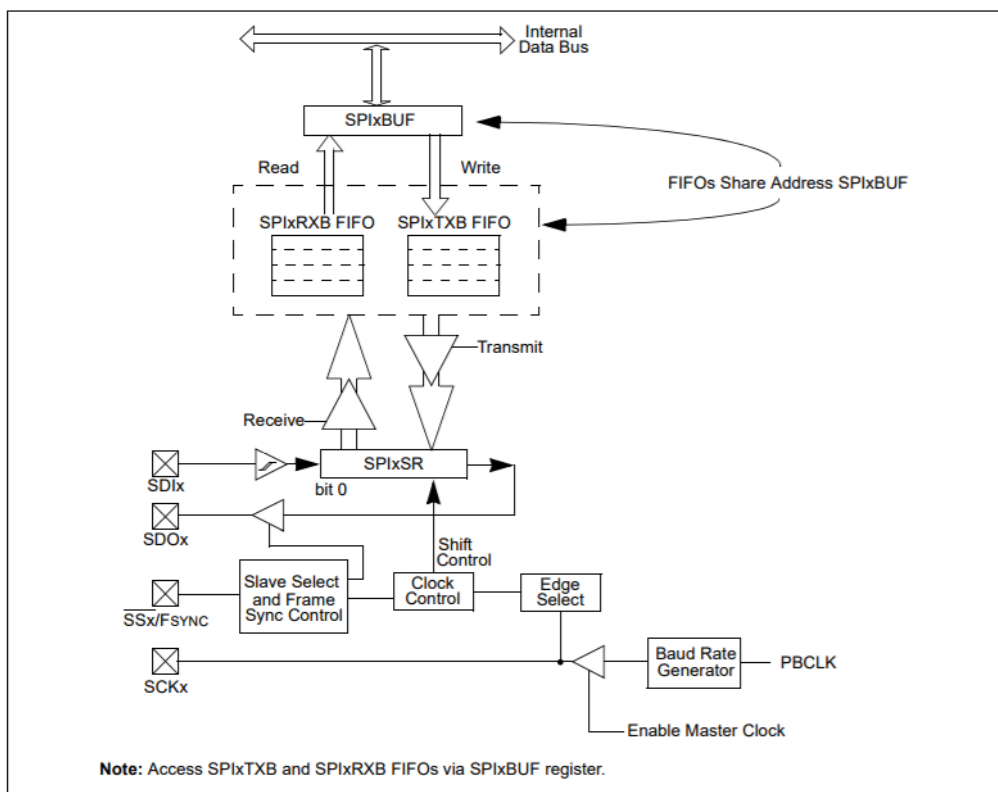
V HARMONY Configuratoru bylo provedeno nastavení hodnot mikrokontroléru, jako například hodnoty frekvencí pro oscilátor. Přesné nastavení v tomto podprogramu je patrné v záložce Options pro nastavení MCU viz obr. níže.



*Obr.:5.2.2.: Clock diagram v HARMONY Configurator*

### 5.2.1. SPI rozhraní

SPI je zkratkou pro “Serial Peripheral Interface” a toto rozhraní slouží pro komunikaci mikrokontroléru s ADC převodníkem a CAN driverem. V této diplomové práci je využíván duplexní SPI. Přenos je synchronní (používá hodiny “Clock”), takže může dosahovat vysokých datových toků. Princip komunikace je jednoduchý a díky tomu je na většině mikrokontrolerů snadná i jeho implementace. Sběrnice je koncipována tak, aby na ní pracoval jeden Master a několik Slave obvodů. Všechny obvody sdílejí trojici linek. Hodiny (SCLK), které jsou generovány Masterem. Linku MOSI (Master Out Slave In) po níž se posílají data z Masteru do Slave a linku MISO (Master In Slave Out) po které se posílají data ze Slave obvodu do Master. Každý Slave má vlastní CS (Chip Select) linku, která slouží jako “adresovací”. Master tedy musí obsluhovat tolik CS linek kolik je na sběrnici připojeno Slave obvodů. [16]

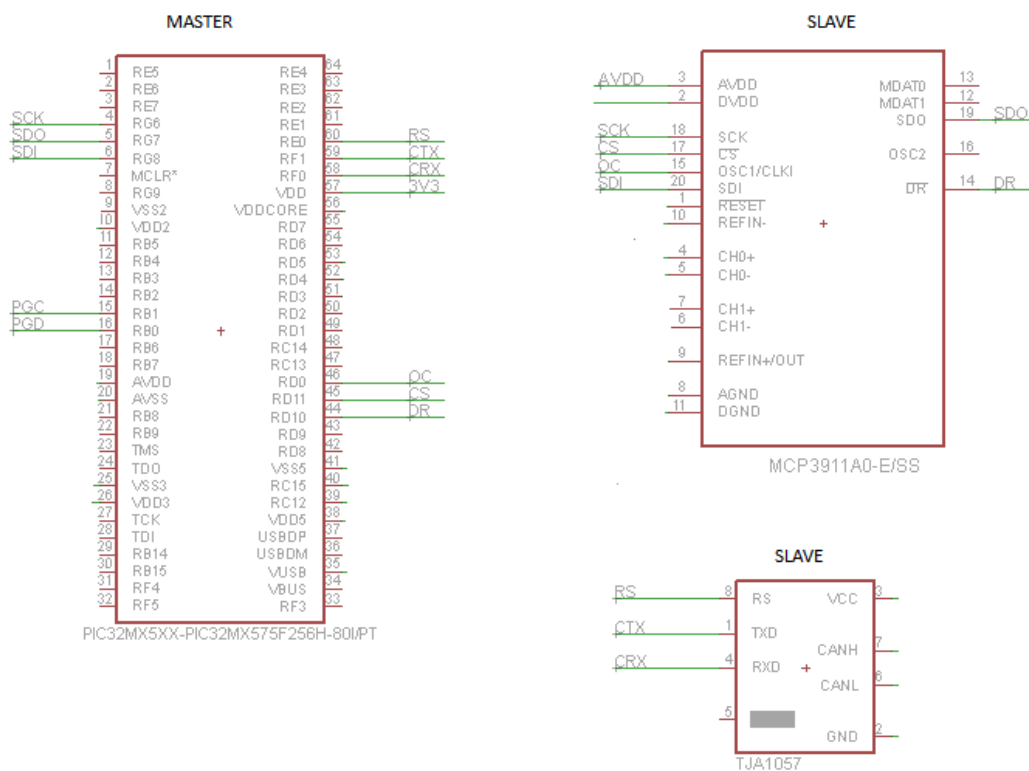


Obr.:5.2.1.1.: SPI blok diagram [3]



Ve fyzické vrstvě dochází k přenosu dat následovně. Jakmile Master pomocí CS pinu vybere některý Slave obvod, tak začne generovat hodiny na lince SCLK. S každým tiknutím hodin (tedy s každou periodou) se přenesou jeden bit po lince MOSI (z Masteru do Slave) a zároveň jeden bit po lince MISO (se Slave do Masteru). Počet datových bitů není obecně nijak specifikován. V tomto programu využíváme 8 bitový mód. Hodiny definují, ve kterém okamžiku má přijímač datovou linku (MOSI nebo MISO) číst. Může to být buďto se vzestupnou hranou nebo se sestupnou hranou SCLK. Žádná specifikace to pevně neurčuje. SCLK je v neutrálním stavu v log. 0 a data se čtou na vzestupnou hranu hodin. [16]

Na obrázku níže je blokově znázorněno zapojení SPI komunikace pro tento projekt, kde je jeden MASTER a to použité MCU PIC32 a k němu dva SLAVE, ADC převodník a CAN driver.



Obr.:5.2.1.2.: Zapojení SPI komunikace

V části programu `drv_spi_mapping.c` probíhá inicializace, deinicializace SPI rozhraní. Dále zde dochází k obsluze událostí pro stanovení statusu, taksu, otevření a zavření SPI a také k plnění bufferu a jeho vyprazdňování.



### 5.2.3. ADC převodník

A/D převodníky zajišťují převod analogového signálu na číslicový. Spojitý analogový signál nejprve vzorkujeme (v určitém okamžiku změříme amplitudu. Potom tuto hodnotu převedeme kvantováním na digitální tvar, vytvoříme výstupní datové slovo. K zajištění přesnosti musíme zajistit:

- Vzorkovací kmitočet musí být minimálně dvojnásobný než maximální kmitočet (jeho nejvyšší harmonická složka) obsažený v analogovém signálu. K zajištění této podmínky zařazujeme obvykle před A/D převodník dolní propust.
- Dostatečnou rychlost vzorkování. Ta vyplývá z nejkratší možné doby převodu. Jedná se o velmi důležitý parametr A/D převodníků.
- Výstupní slovo musí mít dostatečný počet řádů, abychom měli malý kvantizační krok a malou kvantizační chybu (obdobně jako u D/A převodníků). [17]

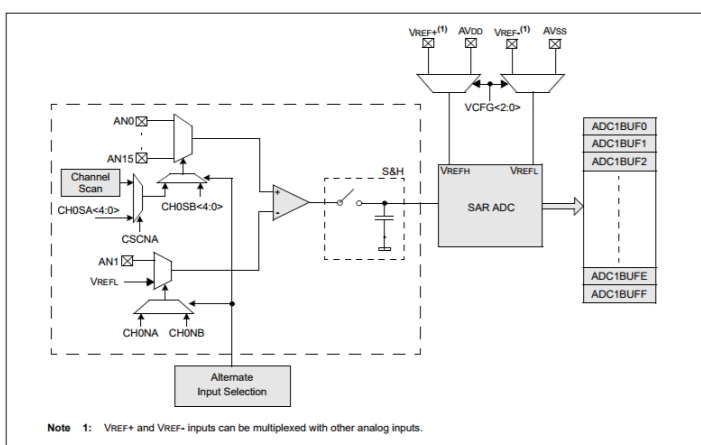
#### Napájení AD převodníku

K napájení A/D převodníku slouží pin AVCC. Musí na něm být připojeno stejné napětí, jakým se napájí mikrokontrolér (tedy stejné jako na VCC). Samotné napájecí napětí mikrokontroléru může být totiž “zarušené”, proto se používá samostatné napájení. Samostatný AVCC pin umožňuje přivést stabilní “nezarušené” napětí pro A/D převodník. [16]

#### Referenční napětí AD převodníku

Referencí se rozumí napětí, vůči němuž převodník vztahuje své výsledky. Převodem získáte zlomek (číslo) z referenčního napětí. Z něj pak hodnotu napětí.

Referenční napětí limituje měřicí rozsah. Měřit lze jen napětí nižší než referenční. Nejvyšší měřitelné napětí je  $V_{ref} \times 1023 / 1024$ . Převodník měří od nuly a výsledek převodu může být nejvýše 1023. Reference má velký význam, protože mimo jiné určuje nejmenší napěťové rozlišení převodníku. Vyplatí se tedy měřit vždy s nejnižší možnou referencí, pak je měření nejcitlivější. [16]



Obr.:5.2.3.1.: ADC modul blok diagram [3]

## Input TC

Vstup z termočlánku (TC) je přiveden na kanál 0 na AD převodníku, tato data jsou dále zasílána přes SPI do mikrokontroléru. V MCU jsou data upraveny do podoby, aby odpovídaly hodnotám v lookup tabulce.

```
adc_tc_value = Read_ADC_Channel(0); // nastavení hodnot s ADC TC do globální proměnné TC

temp_tc = adc_tc_value; //přiřazení do proměnné a výpočet hodnot s ADC pro TC
temp_tc *= 75000; // hodnoty pro přepočet měřených hodnot (viz Datasheet)
temp_tc /= 8388608; // hodnoty pro přepočet měřených hodnot (viz Datasheet)
```

Nyní jsou hodnoty posílané s ADC přepočteny na hodnotu temp\_tc, se kterou je možné níže v programu pracovat, jako s proměnnou možné teploty termočlánku.

## Input NTC

Vstup z NTC je přiveden na kanál 1 na AD převodníku, tato data jsou dále zasílána přes SPI do mikrokontroléru. V MCU jsou data upraveny do podoby, aby odpovídaly hodnotám v lookup tabulce.

```
adc_ntc_value = Read_ADC_Channel(1); // nastavení hodnot s ADC NTC do globální proměnné NTC

temp_ntc = adc_ntc_value; //přiřazení do proměnné a výpočet hodnot s ADC pro TC
temp_ntc *= 75000; // hodnoty pro přepočet měřených hodnot (viz Datasheet)
temp_ntc /= 8388608; // hodnoty pro přepočet měřených hodnot (viz Datasheet)
```

Nyní jsou hodnoty posílané s ADC přepočteny na hodnotu temp\_ntc, se kterou je možné níže v programu pracovat, jako s proměnnou možné teploty NTC článku.

## Zpracování vstupů ADC na teploty

Předzpracování zasílaných hodnot s ADC je popsáno výše v práci, jedná se o úpravu hodnot, tak aby byly možné vyčítat s lookup tabulky.

Lookup tabulka je tabulka ve které jsou zapsány hodnoty odpovídající daným hodnotám teploty. Tabulka může mít libovolný krok mezi hodnotami. U lookup tabulky používané pro termočlánek je použit krok o 1°C, ale u tabulky pro NTC je krok 5°C.

```
// lookup tabulka od 0 do 100 vstup pro TC
int tempTC_099[100]={
  0,26,52,74,104,130,156,182,208,235,
  261,287,313,340,366,393,419,446,472,499,
  525,552,578,605,632,659,685,712,739,766,
  793,820,847,874,901,928,955,983,1010,1037,
  1065,1092,1119,1147,1174,1202,1229,1257,1284,1312,
  1340,1368,1395,1423,1451,1479,1507,1535,1563,1601,
  1619,1647,1675,1703,1732,1760,1788,1817,1845,1879,
  1902,1930,1959,1988,2016,2045,2074,2012,2131,2160,
  2189,2218,2247,2276,2305,2334,2363,2392,2421,2450,
  2480,2509,2538,2568,2597,2526,2656,2658,2715,2744
};
```

*Obr.:5.2.3.2.: Lookup tabulka TC od 0°C do 99°C*

```
// lookup tabulka od -100 do 220 vstup pro NTC
int tempNTC[] = {
  6455,6440,6420,6415,6407,6395,6380,6360,6335,6305,
  6270,6230,6192,6154,6107,6050,5980,5895,5794,5676,
  5539,5382,5205,5009,4794,4564,4320,4067,3808,3546,
  3286,3031,2785,2548,2324,2114,1919,1737,1571,1420,
  1281,1157,1044,943,852,769,701,639,577,527,
  478,434,397,360,329,304,279,204,155
};
```

*Obr.:5.2.3.3.: Lookup tabulka NTC od -100°C do 220°C*

Měřená data většinou neodpovídají přesné hodnotě v tabulce, protože posílaná data nejsou zaokrouhlována na celé stupně případně pětinasobky stupňů, ale zůstávají ve své desetinné podobě. Z tohoto důvodu je nutné provádět aproximaci dat v tabulce. Jelikož se jedná o teplotu a data v tabulce se dají považovat za lineární, proto i aproximace je volena lineární.

Teplota s TC i NTC je zaokrouhlována na jednotky stupňů celsia z důvodu velkého teplotního rozsahu je toto zaokrouhlování dostatečné. U TC i NTC jsou data zaokrouhlována stejně, pouze použitá aproximace se liší s ohledem na použitý krok v look up tabulkách, se kterých vyplývá četnější neshoda zasílaných dat u NTC, než u TC, kde se aproximuje pouze formou zaokrouhlení na nižší, nebo vyšší hodnotu v tabulce. Pro přiřazení teploty s look up tabulky je použit index pole (tabulky) s odečtením, nebo přičtením příslušné konstanty, která posune index prvku pole na správnou teplotu hodnotě odpovídající.

V případě měření záporných hodnot je nutné naměřenou hodnotu odečíst od hodnoty FFFFFF, z důvodu zasílané hodnoty s NTC. Dále se přepočít provádí stejně jako u kladných hodnot. Zasílané hodnoty na CAN jsou pak povýšeny o FF0000, aby se odlišila kladná a záporná měřená hodnota.

```

if (temp_tc>=0 && temp_tc<=2744)          // výpočet hodnoty TC
{
    for ( k=0 ; k<50; k++)
    {
        temp_tc_pom = temp_tc + k;

        for ( m=0 ; m<99; m++ ) // procházení lookup tabulky
        {
            if (temp_tc_pom ==tempTC_099[m]) // porovnávání shody s tabulkou
            {
                val_tc_H = (tempTC_099[m]); // získání horní meze v tabulce
                val_tc_L = (tempTC_099[m-1]); // získání dolní meze v tabulce

                val_tc_rozdil_HL = val_tc_H - val_tc_L; // získání rozdílu mezi
                val_tc_rozdil_ML = temp_tc_pom - val_tc_L; // získání rozdílu meze a měřené hodnoty

                desetinaTC = (val_tc_rozdil_ML*2) / val_tc_rozdil_HL; // získání desetiny stupně

                temp_tc_final=(100 - m)+desetinaTC; // výpis teploty TC na CAN
            }
        }
    }
}

```

Obr.:5.2.3.4.: Lineární interpolace měřených dat TC

U tabulky NTC se také hodnota pole vynásobí konstantou pro konkrétní teplotu v rozmezí mezi pěti stupni. Je to z důvodu nižší přesnosti look up tabulky, ve které jsou hodnoty posílány od -100°C do 220°C s rozmezím 5 stupňů. S tohoto důvodu je přepočten rozšířen o přepočten desetiny, která nekontroluje pouze zda je číslo blíže horní či dolní mezi, ale také kontroluje příslušnou hodnotu v rozmezí 5 stupňů, aby bylo možné posílat hodnoty po jednotkách stupňů stejně jako v případě TC.

```

if (temp_ntc>=155 && temp_ntc<=6455) // výpočet hodnoty NTC
{
    for ( l=0 ; l<250; l++)
    {
        temp_ntc_pom = temp_ntc + l;

        for ( n=0 ; n<58 ; n++ ) // procházení lookup tabulky
        {
            if (temp_ntc_pom ==tempNTC[n]) // porovnávání shody s tabulkou
            {
                val_ntc_H = (tempNTC[n]); // získání horní meze v tabulce
                val_ntc_L = (tempNTC[n-1]); // získání dolní meze v tabulce

                val_ntc_rozdil_HL = val_ntc_L - val_ntc_H; // získání rozdílu mezi
                val_ntc_rozdil_ML = val_ntc_L - temp_ntc_pom; // získání rozdílu meze a měřené hodnoty

                desetinaNTC = (val_ntc_rozdil_ML*2) / val_ntc_rozdil_HL; // získání desetin stupně

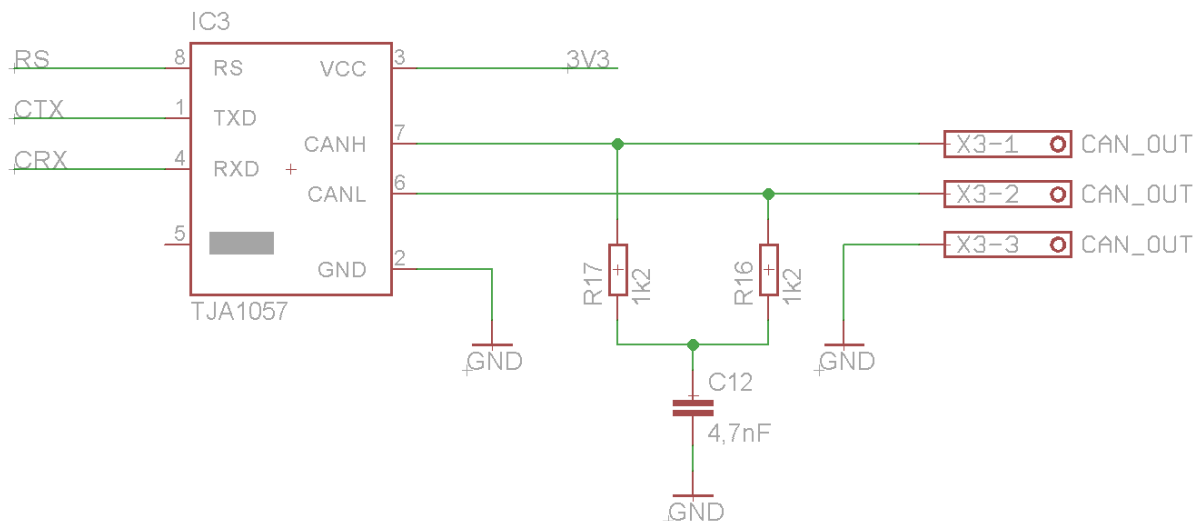
                temp_ntc_final=((n*5)-100)+desetinaNTC; // výpis teploty NTC na CAN
            }
        }
    }
}

```

Obr.:5.2.3.5.: Lineární interpolace měřených dat NTC

### 5.2.4. CAN

CAN komunikace probíhá mezi deskou vysokoteplotního sensoru a uživatelským rozhraním, kterým je PC. Komunikační rychlost je nastavena na 250Mbit/s, jedná se o standardizovanou komunikační rychlost v automotive.



Obr.:5.2.4.1.: Zapojení CAN driveru

Data o teplotách a měření jsou zasílána v definovaném formátu CAN zprávy. Data se posílají v 8 bajtových zprávách, přičemž první a druhý bajt zasílá hodnotu 0 nebo 1, což informuje o správnosti vyčítání teplotních dat z termočlánku a NTC.

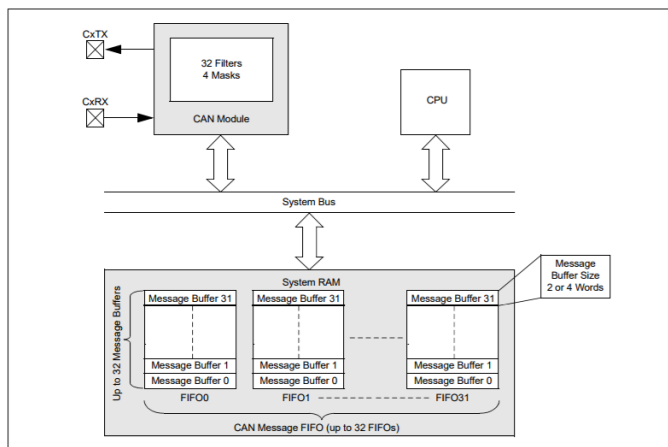
```
if (temp_tc > 0 && temp_tc < 47513) // zjišťování chyby vyčítání hodnot z TC
{
    error_temp_tc = 1; // bez chyby
}
else
{
    error_temp_tc = 0; //chyba rozpojení/zkrat
}

if (temp_ntc > 155 && temp_ntc < 6455) // zjišťování chyby vyčítání hodnot z NTC
{
    error_temp_ntc = 1; // bez chyby
}
else
{
    error_temp_ntc = 0; //chyba rozpojení/zkrat
}
```

Obr.:5.2.4.2.: Hlídaní chyby v přijímaných datech



Informace o teplotách je zasílaná na následujících 6 bajtech. Na třetím až pátém bytu je zasílaná přepočtená teplota z termočlánku. Na šestém až osmém bytu je zasílaná teplota s NTC. Jedná se o zasílané parametry temp\_tc\_final a temp\_ntc\_final. Tyto parametry jsou přepočteny viz kapitola výše. V případě měřené záporné teploty je první byt u TC přeplopen z 00 na FF.



Obr.:5.2.4.3.: CAN blok diagram [3]

Can zprávy jsou zasílány s ID 12Ch ve formátu viz obr.5.2.4.4. Zasílané zprávy jsou zasílány s kódováním ASCII. CAN driver TJA1057 zasílám zprávy standardně v kódování Motorola, ale v programu je toto zasílání přeplopeno na ASCII z důvodů lepší práce s daty.

CAN Message				
ID zprávy	Bajt	Název	Možné stavy	Poznámka
12C	0	ERROR TC	0/1	Chyba TC (rozpojení / zkrat)
	1	ERROR NTC	0/1	Chyba NTC (rozpojení / zkrat)
	2	TEMP TC	0/F	Kladná hodnota 0 / záporná hodnota F
	3		0-F	Vyšší bajt měřené hodnoty TC
	4		0-F	Nižší bajt měřené hodnoty TC
	5	TEMP NTC	0/F	Kladná hodnota 0 / záporná hodnota F
	6		0-F	Vyšší bajt měřené hodnoty NTC
	7		0-F	Nižší bajt měřené hodnoty NTC

Obr.:5.2.4.4.: Formát zasílaných zpráv po CAN

```
LED_GREENon(); // kontrolní LED

TestMessage[0] = error_temp_tc; // chybový byt 0=chyba tc
TestMessage[1] = error_temp_ntc; // chybový byt 0=chyba ntc
TestMessage[2] = temp_tc_final >> 16; // teplota TC;
TestMessage[3] = temp_tc_final >> 8; // teplota TC
TestMessage[4] = temp_tc_final; // teplotaTC
TestMessage[5] = temp_ntc_final >> 16; // teplota NTC;
TestMessage[6] = temp_ntc_final >> 8; // teplota NTC
TestMessage[7] = temp_ntc_final; // teplota NTC

while(DRV_CAN0_ChannelMessageTransmit(CAN_CHANNEL0, 300,8, &TestMessage[0]) == false); // zpětná vazba od CAN loggeru
```

Obr.:5.2.4.5.: Zasílání zpráv po CAN

## 6. Verifikace a testování

Část testování a verifikace se věnuje testování dílčích částí HW, aby byla ověřena správná funkce plošného spoje. Také je zde testován SW, jehož testování probíhá průběžně při jeho tvorbě, aby se daly odladit jednotlivé celky programu. Program jako celek je možné odzkoušet pouze společně s hardwarovou částí. Testování obou hlavních celků této práce se věnuje část Verifikace teplotního sensoru. Tato část testuje teplotní sensor jako celek a otestuje tak správnou funkčnost vysokoteplotního sensoru včetně CAN komunikace.

### 6.1. Oživení a ověření HW části

Ověření správné funkčnosti desky plošného spoje proběhlo v několika etapách. Toto ověřování bylo záměrně prováděno po částech, aby se snížilo riziko poškození dílčích částí desky způsobených špatným zapájením, nebo osazením prvků na desce.

Jako první proběhla vizuální kontrola správnosti osazení prvků na desce. Poté je za pomoci multimetru prozvonily všechny kontakty, zda došlo ke správnému zapájení jednotlivých pinů. Po těchto dvou testech bylo možné připojit desku ke stabilizovanému zdroji s jistým výstupem, aby se zamezilo možnému riziku zničení. Jako indikace správného napájení slouží kontrolní LED dioda umístěná za stabilizovaným zdrojem na DPS.

Po připojení ke zdroji došlo také k proměření napájení u všech komponentů čímž se ověřilo, že deska je připravena k nahrání SW a jeho testování. Další testování HW části nebylo nutné, protože případné nedostatky by se projevíly při testování teplotního sensoru jako celku.

## 6.2. Ověření SW části

Softwarová část práce se ověřovala postupně, nejprve jako kód pouze v PC, a poté postupně nahráváním do DPS. Prvotním testem bylo nahrání programu s nastaveným SPI rozhraním a timerem, přičemž jako ověření správnosti sloužila kontrolní LED dioda, která se indikačně rozblikala.

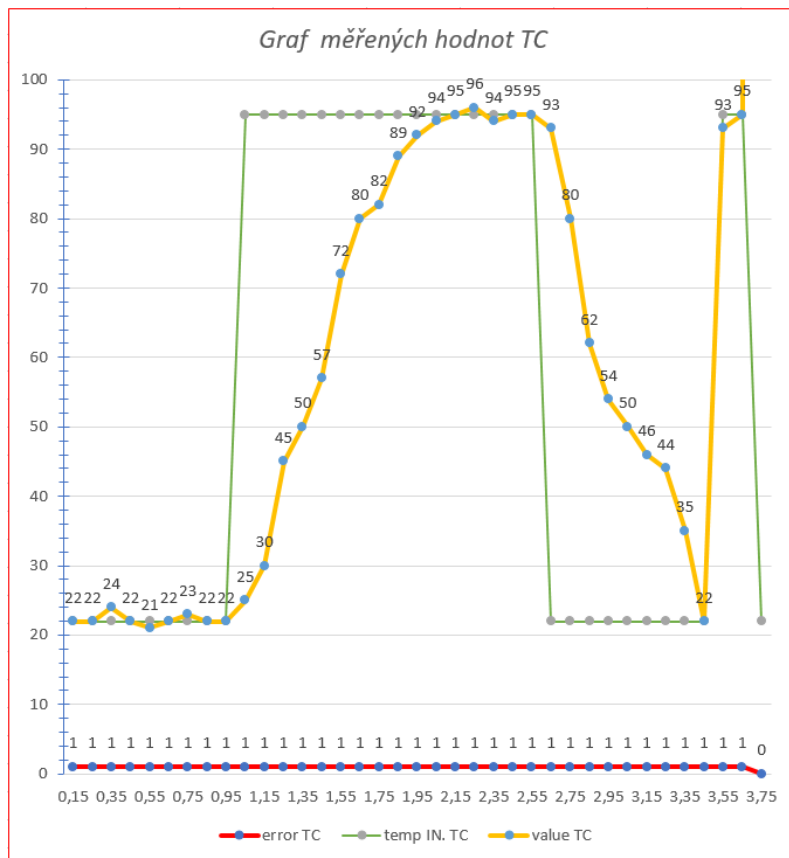
Dále se postupným rozšiřováním kódu a jeho nahráváním a testováním buďto kontrolou na desce, nebo kontrolou ve Watches tabulce a sledováním změny příslušných parametrů. Toto testování také probíhalo ručním zadáváním na vstupy a kontrola očekávaných výstupů prokázala správnost programové části.

Variables	Watches *	Call Stack	Output
Name	Type	Address	Value
<input checked="" type="checkbox"/> adc_ntc_value	__uint32_t	0xA000023C	40530
<input checked="" type="checkbox"/> adc_tc_value	__uint32_t	0xA0000238	3130193
<input checked="" type="checkbox"/> temp_tc	__int32_t	0xA0000224	0
<input checked="" type="checkbox"/> temp_ntc	__int32_t	0xA0000240	0
<input checked="" type="checkbox"/> temp_tc_final	__int32_t	0xA000021C	0
<input checked="" type="checkbox"/> temp_ntc_final	__int32_t	0xA0000220	0
<input checked="" type="checkbox"/> error_temp	__int32_t	0xA0000230	0
<input checked="" type="checkbox"/> val_tc_H			Out of Scope
<input checked="" type="checkbox"/> val_tc_L			Out of Scope
<input checked="" type="checkbox"/> temp_tc_pom			Out of Scope

Obr.:6.2.1.: Ukázka Watches tabulky

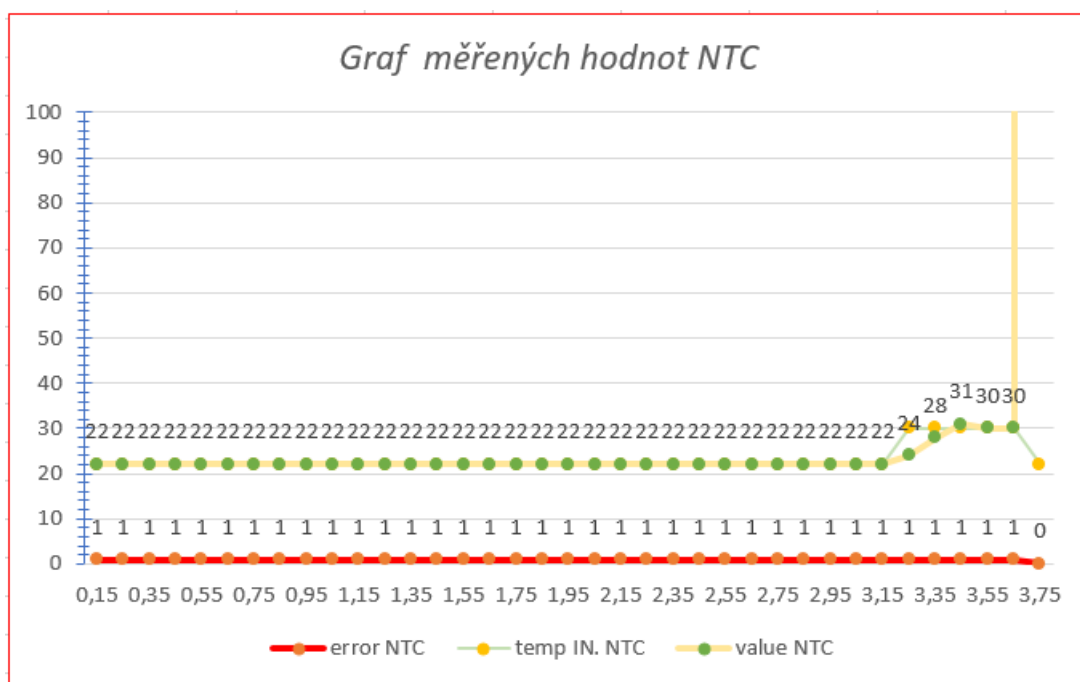


Na grafu je patrné měření teploty při zahřívání z pokojové teploty 22°C na teplotu vroucí vody na cca 95°C patrné na zelené křivce. Při zahřívání je patrné zpoždění měření cca 1s u nástupné i sestupné hrany grafu což je patrné na sledování zelené křivky, křivkou oranžovou. Na grafu je také patrná simulace poruchy TC, kde se hodnota erroru rovná 1 při správném měření a 0 při detekované poruše.



*Obr.:6.3.3.: Graf měřených hodnot TC*

Na grafu je patrné měření teploty při zahřívání z pokojové teploty 22°C na teplotu výdechu sušiče na cca 30°C patrné na zelené křivce. Při zahřívání je patrné zpoždění měření cca 30ms u nástupné i sestupné hrany grafu což je patrné na sledování zelené křivky, křivkou oranžovou. Na grafu je také patrná simulace poruchy TC, kde se hodnota erroru rovná 1 při správném měření a 0 při detekované poruše.



Obr.:6.3.4.: Graf měřených hodnot NTC

Na základě testovaných dat posílaných na vstup teplotního sensoru a porovnání těchto dat s daty přijímanými přes CAN je patrné, že deska pracuje dle očekávání. Testoval se teplotní skok z pokojové teploty cca 22°C na teplotu vroucí vody cca 100°C a zpět na pokojovou teplotu. Z grafu výše jsou patrné teplotní skoky. Pro změnu teplot NTC byl použit fén cca 30°C. Na konci měření byla provedena simulace rozpojení TC a zkratu NTC, kdy se hodnota teploty zobrazuje jako FFFFFFFF (maximální možná hodnota) a proměnná error se překlopil do 0.

## 7. Zhodnocení dosažených výsledků

Zhodnocení dosažených výsledků je postaveno celkové problematice vysokoteplotního měření, návrhu a konstrukci desky plošného spoje a programu pro vyčítání a úpravu měřených dat. Tyto hlavní celky jsou základní pilíře pro kompletaci vysokoteplotního sensoru.

Pro správný návrh desky plošného spoje bylo důležité seznámit se principem měření pomocí termočlánku a zpracováním takto získaných dat. Návrh DPS proběhl v programu Eagle, kde byla odvozena teoretická funkčnost desky s datasheetů k jednotlivým komponentům a pochopení jejich vzájemné funkce. Po návrhu a této desky a vytvoření masky pro tvorbu DPS byly hotové podklady k samotné tvorbě desky plošného spoje

Po zhotovení desky byla možná její kontrola, která proběhla po částech, aby se předešlo poškození desky a komponent na ní umístěných. Proběhlo celkové oživení a kontrola desky, což vedlo k výsledku, že deska je správně zapojená a je možné ji k dané aplikaci použít.

Při průběžném testování programu je zároveň ověřovala také funkčnost desky. Program se testoval postupně nahráváním do procesoru desky a sledováním odezvy na desce, nebo sledováním parametrů ve watch tabulce přímo v programovacím prostředí. Takto se odzkoušel celý program až do verifikovatelného stavu.

Celková verifikace a testování vysokoteplotního sensoru proběhla způsobem testování jako black box, přičemž jsme vstup teplotního sensoru zahřívali na známou teplotu a sledovali odezvu, kterou sensor zasílal do PC přes CAN komunikaci. Takto došlo k celkovému testu funkčnosti vysokoteplotního senzoru a bylo patrné, že sensor pracuje správně.

Dosažený sensor pracuje s přesností na 1°C na dvou kanálech. Jeden kanál je vyčleněn pro měření chladného bodu pomocí NTC a druhý kanál je použit pro měření teploty pomocí TC. Měřené hodnoty se zpracovávají a zasílají po CAN 2.0.B sběrnici v taktu 100ms. Tento sensor je dosti robustní pro laboratorní prostředí.

## 8. Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo seznámení se s problematikou vysokoteplotního měření. Především však měřením v oblasti automotive. K sestavení vysokoteplotního sensoru na bázi termokaplového jevu bylo zapotřebí pochopit princip fungování a měření termočlánu. V této diplomové práci jsem používal termočlánek typu N, proto jsem si jej nastudoval nejdetailněji.

Na základě pochopení funkce termočlánu bylo nutné vytvořit koncepci zpracovávání získaných napětí s termočlánu. Pro tuto aplikaci jsem se rozhodl zpracovávat data za použití mikrokontroléru PIC32, který byl použit jako řídicí jednotka celého sensoru. Mikrokontroléry mají vlastní ADC převodník, ale ten nedosahoval potřebné přesnosti pro vyčítání hodnot s termočlánu, proto jsem se rozhodl použít přídavný AD převodník, který je 24 bitový, což umožňuje velmi přesné vyčítání dat. Pro posílání naměřených a přepočtených dat jsem použil CAN driver, který posílá data po CAN do PC.

Po vytvoření konceptu zpracování naměřených dat a jejich posílání do PC jsem vybral potřebné komponenty na základě požadovaných parametrů a vytvořil schéma plošného spoje v programu Eagle. V tomto programu jsem také vytvořil návrh plošného spoje včetně rozmístění všech potřebných komponent na desku a připravil jsem masku pro leptání plošného spoje. Plošný spoj jsem vyleptal pomocí foto cesty a potřebných kyselin na oboustrannou kuprexitovou desku. Volil jsem oboustranné osazení desky z důvodu úspory místa a tím i zmenšení celého sensoru. Byť velikost senzoru nebyla rozhodující, protože se jedná pouze o demonstrační příklad vysokoteplotního sensoru.

Osazení desky plošného spoje jsem provedl pomocí mikro pájky. Po napájení všech komponent na desku jsem provedl zkoušku osazení. Při testování jsem zjistil, zda jsou správně napájené všechny komponenty na desce a jestli je správně přivedeno napájení. Po tomto testu byla deska připravena k nahrání SW.

Program jsem tvořil v prostředí MPLAB určeném pro mikrokontroléry PIC. Program jsem testoval po částech, abych měl jistotu správné funkce jednotlivých částí. Také při ladění programu jsem si ověřoval správnou funkci desky. Programy bylo třeba testovat jak postupně, tak také jako celek, jak se chová kompletní sensor.

Testování celého vysokoteplotního sensoru na bázi termokaplového jevu s komunikací CAN jsem testoval způsobem černé skříňky, protože se mi tento způsob testování zdál nejprokazatelnější a nejvhodnější k dané aplikaci. Teplotní sensory jsem zahrál na definovanou teplotu, kterou jsem poté porovnal s teplotou zasílanou do PC přes CAN komunikaci. Srovnáním těchto dvou údajů jsem dostal prokazatelné potvrzení správnosti funkce celého teplotního sensoru.

Tato práce byla pouze názorná, proto by zde byly možné vylepšení do budoucna. Hlavní zlepšení, pro použití v automotive by byla minimalizace celého sensoru. S touto minimalizací souvisí také vynechání pomocných LED diod a tlačítka, které by již nebyly zapotřebí z důvodu odladěného kódu. Také bych použil jiné MCU, které by mělo co nejméně vstupů/výstupů, aby se zjednodušila implementace na desku a zlevnila výrobu. Svorky pro vstup s termočlánu a pro napájení a také výstup na ADC bych nahradil pevným připojením, protože každé místo styku může být zdrojem poruch. Zbylé komponenty jsou navrženy s ohledem na jejich rozměr a poměr kvalita výkon.



## 9. Použitá literatura

- [1] ŠIMAN, Martin. *Návrh měřicí karty pro měření s termočlánkem*. Plzeň, 2015 [cit. 2017-01-17]. Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI.
- [2] ING.TARABA, Radek. Aplikování sběrnice CAN. *Http://vyvoj.hw.cz/* [online]. [cit. 2017-01-17].
- [3] Microchit, *Http://cz.microchip.com/* [online]. [cit. 2017-01-17].
- [4] Farnell. *Http://cz.farnell.com/* [online]. [cit. 2017-01-17].
- [5] KRAČMAR, Stanislav a Jiří VOGEL. *Programovací jazyk C*. Praha, 1995. Skriptum. ČVUT.
- [6] Přehled principů el. měření teploty. *Http://automatizace.hw.cz/* [online]. 2014 [cit. 2017-01-17].
- [7] RIPKA, P. *Senzory teploty*. Praha, 2010. Skriptum. ČVUT.
- [8] *ANALOGOvé VSTUPY* [online]. [cit. 2017-12-09]. Dostupné z: <http://plc-automatizace.cz>
- [9] HARČAR, František. *MĚŘENÍ TEPLoty POMOCÍ MIKROKONTROLÉRU*. Brno, 2018. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce ING. DANIEL ZUTH.
- [10] ZÁVIDČÁK, Ing.Miroslav. *CAN - popis struktury* [online]. In: . [cit. 2017-12-09].
- [11] SCHILZ PHD, Jürgen. *THERMOELECTRIC INFRARED SENSORS (THERMOPILES) FOR REMOTE TEMPERATURE MEASUREMENTS; PYROMETRY* [online]. In: . [cit. 2017-12-09].
- [12] HUSÁK, Prof. Ing. Miroslav. *Přehled principů el. měření teploty* . In: . [cit. 2017-12-09].
- [13] GRUNER, Klaus-Dieter. *Principles of Non-Contact Temperature Measurement* [online]. In: . [cit. 2017-12-09].
- [14] HUŠEK, Ing.Miloš. *PRINCIP BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLoty A VYSVĚTLENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ* [online]. In: . [cit. 2017-12-09].
- [15] *Cuprexit s vrstvou pozitivní fotoemulze* . In: . [cit. 2017-12-09].
- [16] DUDKA, Michal. *SPI rozhraní* [online]. In: . [cit. 2017-12-09].
- [17] VLČEK, Ing. Jiří. *D/A a A/D převodníky* [online]. In: . [cit. 2017-12-09].
- [18] Král Jiří: *Základy programování jednočipových mikropočítačů v assembleru a jazyku C*, skriptu
- [19] Kreidl Marcel: *Měření teploty – senzory a měřicí obvody*, BEN, 2005
- [20] G.C.M. Meijer and A.W. van Herwaarden, *Thermal Sensors*, IOP Publishing Ltd., Bristol and Philadelphia (1994).
- [21] Kračmar Stanislav, Vogel Jiří: *Programovací jazyk C*, ČVUT, 2002

## **10. Přílohy**

### **HW část**

1. **THERMO\_Schema\_PIC32.png**
2. **THERMO\_Layout\_PIC32.png**

### **SW část**

1. **Mereni\_teploty.rar**